



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

Kaisu Kyröläinen

BIOHIILEN KÄSITTELYN JA LOGISTIIKAN ENERGIATALOUDELLINEN TARKASTELU

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.3.2013.**

Valvoja

Professori Olli Dahl

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Petri Vesanto

Tekijä Kaisu Kyröläinen

Työn nimi Biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiataloudellinen tarkastelu

Laitos Puunjalostustekniikka

Professori Ympäristöasioiden hallinta

Professuurikoodi Puu-127

Työn valvoja Professori Olli Dahl

Työn ohjaaja DI Petri Vesanto

Päivämäärä 23.03.2013

Sivumäärä 95

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Biohiili on bioenergiamuoto, joka valmistetaan torrefioimalla puubiomassaa hapettomissa olosuhteissa 200–300 °C. Torrefiointi muuttaa puubiomassan rakennetta ja biohiilen ominaisuudet muuttuvat lähelle kivihiilen ominaisuuksia, minkä vuoksi sen käyttöä ja soveltuvuutta tutkitaan CHP -voimalaitoksissa kivihiilen korvaajana.

Kirjallisuusosuudessa tarkasteltiin biohiilen ominaisuuksia ja torrefioinnin aikana tapahtuvia rakenteellisia muutoksia ja niiden vaikutusta käsittelyyn ja logistiikkaan. Lisäksi työssä tutkittiin biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiataloudellisuutta. Energiataloudellinen tarkastelu suoritettiin kehitettyä laskentamallia käyttäen ja soveltaen sitä case – tapaukseen. Case-tapauksessa tutkittiin biohiilen kuljettamista Pohjolan Voiman tuotantolaitokselta Kristiinankaupungista Helsingin Energian voimalaitokselle Helsingin Salmisaareen. Laskentamallin avulla analysoitiin pelletöinnin, varastoinnin ja jauhamisen energiankulutuksia eri kuljetusskenaarioilla.

Kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiataloutta eri kuljetusskenaarioilla. Tuloksien mukaan biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiankulutus on 6 % biohiilestä saadusta polttoaine-energiamäärästä. Pelletöinnin osuus tästä polttoaine-energiamäärästä oli merkittävä noin 75 %, joka tuki kirjallisuudessa havaittuja biohiilen pelletöinnissä ilmenneitä vaikeuksia. Kuljettamisen osuus oli vain 13 %, riippumatta kuljetusskenaarioista. Biohiilen energiasisällön muutoksia arvioitiin herkkyysanalyysin avulla ja huomattiin, että biohiilen tiheyden nousu laskee logistiikkakustannuksia, mutta toisaalta nostaa pelletöinnin kustannuksia.

Kustannuksiltaan maantiekuljetus oli kannattavin vaihtoehto case-tapauksen asettamien reunaehtojen puitteissa. Olettaen, että infrastruktuuri on olemassa, rautatiekuljetus on yleisesti ottaen energiataloudellisesti ja kustannuksiltaan kannattavin vaihtoehto kotimaan pitkillä etäisyyksillä. Merirahdin edut tulevat esiin vasta suuremmilla volyymeilla.

Avainsanat Biohiili, torrefiointi, tiivistäminen, jauhatus, energiatalous, logistiikka

Author Kaisu Kyröläinen

Title of thesis Study on energy economy of bio-coal treatment and logistics

Department Forest Products Technology

Professorship Environmental Management

Code of professorship Puu-127

Thesis supervisor Professor Olli Dahl

Thesis advisor Petri Vesanto, M.Sc. (Tech.)

Date 23.03.2013

Number of pages 95

Language Finnish

Abstract

Bio-coal is a solid fuel made from wood biomass in a torrefaction process. Torrefaction is carried out at 200-300 °C in absence of free oxygen. The torrefaction process leaves wood biomass with more coal-like properties. The aim of the torrefaction research is to verify the capability and suitability of bio-coal as a substituent for coal. Bio-coal can be co-fired with coal in CHP-production in coal-fired power plants. This master's thesis was done for Novox Oy, as a part of an assignment of Helsingin Energia's TISCO-Helen –project.

First this study observed the torrefaction process, the structure changes of wood biomass and their effect on bio-coal fuel and treatment properties. The objective of this thesis was to study energy economy of bio-coal treatment and logistics. It was implemented by using an energy-economic model, which was applied to a hypothetical case. In this case the bio-coal production was placed PVO Lämpövoima Oy's Kristiinankaupunki, where bio-coal was transported to Helsingin Energia's Salmisaari power plant. The purpose of this model was to analyze energy consumption of pelletizing, storage and milling in different kind of transport scenarios and find a best transportation method for this case, both energy and cost efficiently.

According to the results of the model, the energy consumption of bio-coal treatment and logistics is 6 % of the overall bio-coal fuel energy content. From this, the part of pelletizing was notable, approx. 75%, which confirms literature findings. The transportation was only 13 %, regardless of the transportation method. The sensitivity analysis of bio-coal density was also done and was noticed that the increase of bio-coal density decreases the costs of logistics, but increases the costs of pelletizing.

Road transportation scenario was the most efficient transportation method in this case. In general, rail transportation is the energy and cost effective way of transporting bio-coal inland, given that infrastructure exists. The advantages of sea transportation can be seen only on long distances and on higher volumes.

Keywords Bio-coal, torrefaction, grindability, densification, logistics, energy economy

Alkusanat

Diplomityö toteutettiin Helsingin Energian toimeksiantona Novox Oy:llä. Työn valvojana toimi professori Olli Dahl ja ohjaajana DI Petri Vesanto (Novox Oy).

Erityiskiitokset lisäksi työtä käsitteleviin kokouksiin osallistuneille Helsingin Energian Jussi Kukkoselle, Talent Vectian Pekka Koskiselle sekä UPM:n Lauri Talikalle, Mika Koposelle ja Markku Haliselle, jotka olivat mukana mahdollistamassa tutkimuksen toteutuksen, auttoivat tulosten käsittelyssä ja analysoinnissa sekä tukivat minua tutkimuksen edetessä.

Erityisesti haluan kiittää työn ohjaajaa Petri Vesantoa korvaamattomasta avusta, ohjauksesta ja kärsivällisyydestä. Parempaa ohjaajaa tuskin olisi voinut saada. Lisäksi haluan kiittää suuresti kaikkia muita työssä avustaneita sekä kaikkia työn eri vaiheissa haastattelemiani henkilöitä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni, ja erityisesti Tarjaa ja Tommia saamastani tuesta, loputtomasta tsemppauksesta ja avusta, jonka ansiosta jaksoin puurtaa diplomityön valmiiksi.

Helsingissä 23.3.2013

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	10
2.	BIOHIILI	14
2.1	Taustaa	14
2.2	Puubiomassa	15
2.3	Torrefiointiprosessi	17
2.3.1	Hemiselluloosa.....	19
2.3.2	Ligniini.....	20
2.3.3	Selluloosa.....	21
2.3.4	Paahtokaasut	21
2.3.5	Paahtoaste	23
2.4	Polttoaineominaisuudet.....	24
2.4.1	Massa- ja energiatase	25
2.4.2	Lämpöarvo	26
2.4.3	Hydrofobisuus ja tasapainokosteuspitoisuus.....	27
2.5	Mekaaniset ominaisuudet.....	29
2.5.1	Jauhautuvuus.....	29
2.5.2	Tiivistettävyyys.....	32
2.5.3	Kestävyys.....	35
2.6	Varastokäyttäytyminen	37
2.6.1	Pölyävyys ja räjähdysherkkyys	38
2.6.2	Hajoaminen	39
2.6.3	Itsesyttyminen	40
3.	LOGISTIIKKAKETJU.....	41
3.1	Energiataloudellisuus logistiikassa	42
3.2	Kuljettaminen.....	42
3.2.1	Maantiekuljetukset.....	43
3.2.2	Rautatiekuljetukset.....	44
3.2.3	Alus- ja proomukuljetukset.....	45
3.2.4	Kuljetusmuotojen energiankulutukset.....	46

3.2.5	Kuljetuskustannukset	46
3.3	Varastointi.....	48
3.4	Lastaus-, purku- ja kuljetinratkaisut.....	48
3.5	Turvallisuusluokittelut	51
4.	TUTKIMUSMENETELMÄT	52
4.1	Erkaantuvien kaasujen analysointi.....	52
4.2	Itsesyttyminen	53
4.3	Jauhatustestit	54
5.	CASE: BIOHIILI SALMISAAREEN	56
5.1	Tarkastelun tausta ja sisältö	56
5.2	Biohiilen tuotanto, käyttö ja varastointi.....	56
5.2.1	Kristiinankaupunki.....	56
5.2.2	Salmisaari.....	58
5.3	Biohiilen toimitus- ja kuljetusskenaariot	62
5.3.1	Kristiinankaupunki – Salmisaari	63
5.3.2	Kristiinankaupunki – Välivarasto – Salmisaari.....	63
6.	TUTKIMUKSEN SUORITUS JA TULOKSET	65
6.1	Tutkimuksen suoritus.....	65
6.2	Tutkimustulokset.....	68
6.2.1	Käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutus.....	68
6.2.2	Käsittely- ja logistiikkaketjun kustannukset	69
6.2.3	Tiheyden herkkyysanalyysi.....	70
6.3	Tutkimustulosten tarkastelu	72
7.	YHTEENVETO.....	77
	LÄHDELUETTELO	80
	LIITTEET	90

LYHENNELUETTELO

ADR	ADR -sopimus (European Agreement concerning the international carriage of Dangerous goods by Road) on sopimus vaarallisten aineiden kansainvälisistä tiekuljetuksista. Sopimuksessa on määritelty eri osapuolten vastuut ja velvollisuudet kuljetustapahtuman aikana.
ATEX	Euroopan yhteisön direktiiveistä 94/9/EY (laitedirektiivi) ja 1999/92/ EY (työolosuhdedirektiivi) käytetty lyhenne. Direktiivit koskevat räjähdysvaarallisia tiloja, niissä työskentelyä ja niissä käytettäviä laitteita.
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power) on tuotantomuoto, jossa samassa prosessissa tuotetaan samanaikaisesti sähkön lisäksi lämpöä.
DTI	Danish Technological Institute
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
EMC, [%]	Tasapainokosteuspitoisuus (Equilibrium Moisture Content) tarkoittaa pitoisuutta, jossa materiaalin kosteus ei lisäännä eikä vähene. Tasapainokosteuden arvoon vaikuttaa ilman suhteellinen kosteus (RH) ja lämpötila.
GHS	GHS -järjestelmä (Globally Harmonised System of classification and labelling of chemicals) on YK:n alaisuudessa kehitetty kokonaisuus, jonka tavoitteena on yhdenmukaistaa kemikaalien luokitus- ja merkintäjärjestelmä maailmanlaajuisesti. GHS -järjestelmä tarjoaa tietoja aineiden fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista ja ihmisen terveyteen sekä ympäristöön kohdistuvista vaaroista kuljetuksen, varastoinnin ja käytön aikana.

GT	Bruttovetoisuus (Gross Tonnage), aluksen koko vetoisuutta osoittava luku. Bruttovetoisuutta osoittavaa lukua käytetään mm. eräiden merenkulkumaksujen sekä aluksen miehistön pätevyyden ja lukumäärän määräytymisperusteena.
HGI	Hardgroven jauhautuvuusindeksi (Hardgrove Grindability Index) kuvaa hiilen jauhatusvastusta.
HSE	Health, Safety and Environmental
IE	Teollisuuden päästöjä koskeva direktiivi (2010/75/EU, Industrial Emissions Directive, IE -direktiivi).
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
JOT	Juuri Oikeaan Tarpeeseen. Tuotannon materiaalinhankintaperiaate ja -järjestelmä, jolla pyritään minimoimaan välivarastot ja odotusajat tuomalla työkappaleet pienissä erissä suoraan työasemille. Korostaa toiminnan pääomien kierron nopeuden merkitystä kannattavuudelle.
LHV, [MJ/kg]	Tehollinen eli alempi lämpöarvo (Lower Heating Value) tarkoittaa lämpö määrää, joka syntyy poltettaessa yksi massayksikkö polttoainetta, kun palamistuotteessa oleva vesi jää höyryn muotoon.
LOC	Rajahappipitoisuus (Limiting Oxygen Concentration) kuvaa alinta happipitoisuutta, missä palavan pölyn ja kaasun seos voi muodostaa syttyvän seoksen.
MSDS	Käyttöturvallisuustiedote (Material Safety Data Sheet)

PAH	Polysyklinen Aromaattinen Hiilivety. PAH -yhdisteitä syntyy epätäydellisen palamisen seurauksena fossiilisia polttoaineita poltettaessa teollisuudessa ja liikenteessä sekä metsäpaloista. Useat PAH-yhdisteet ovat syöpää aiheuttavia eli karsinogeenisia aineita.
REACH	Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 1907/2006 kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of CHemicals, REACH.
RES	Renewable Energy Source, käytetään usein suomenkielisessä tekstissä lyhenteenä direktiivistä (2009/28/EY)
RH, [%]	Suhteellinen kosteus (Relative Humidity) ilmaisee, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä siihen nähden, mitä kyseisessä lämpötilassa voi olla enimmillään vesihöyrynä.
SECTOR	Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction.
SPME	Kiinteäfaasi-mikrouutto (Solid Phase Microextraction)
TISCO	Torrefaction – Integration and Suitability for CO- firing, Tekes -rahoitteinen hanke.
TOP	TOrrrefaction and Pelletisation

1. JOHDANTO

Bioenergian käyttö on lisääntynyt Suomen lisäksi myös muissa EU-maissa. Ilmastonmuutosta aiheuttavien kaasujen vähentämistavoitteet ja EU:n direktiivi uusiutuvan energian käytön edistämisestä (2009/28/EY), ns. RES -direktiivi, ovat lisänneet kysyntää bioenergiamarkkinoilla. EU:n kunnianhimoisen tavoitteen 20–20–20 mukaan vuoteen 2020 mennessä tulisi EU:n energiankulutuksesta 20 % saada uusiutuvista lähteistä, EU:n kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää 20 % sekä energiatehokkuutta lisätä 20 %. /1/.

Hallituksen ilmasto- ja energiapolitiikan ministerityöryhmä pääsi huhtikuussa 2010 yhteisymmärrykseen uusiutuvan energian velvoitepaketin sisällöstä. EU-velvoitteen mukaisesti Suomen on nostettava uusiutuvan energian osuus 38 % energian kulutuksesta vuonna 2020. Ministerityöryhmän mukaan uusiutuvan energian haastavaan lisäystavoitteeseen päästään edistämällä erityisesti bioenergian käyttöä. Uusiutuvan energian velvoitepaketissa esitettiin yhtenä toimenpiteenä kivihiilen korvaamista biomassalla yhteistuotannon (CHP) kivihiilipölypolttokattiloissa. /2/.

Laitosten rikki- ja typenoksideja sekä hiukkaspäästöjä koskevat päästömääräykset kiristyvät vuodesta 2016 alkaen IE -direktiivin mukaisesti, ja niiden täyttäminen edellyttäne useilla laitoksilla merkittäviä investointeja. Biomassaratkaisut ja biohiilen käyttöönotto kytkeytyvät IE -direktiivin edellyttämiin päästövähennysinvestointeihin. /3/.

VTT:n tekemässä työ- ja elinkeinoministeriön tilaamassa selvityksessä /3/ on esitelty teknisiä mahdollisuuksia kivihiilen korvaamiseen yhteistuotannon pölypolttokattiloissa erityyppisillä biomassoilla ja niistä valmistetuilla jalosteilla, kuten mm. biohiilellä. Tutkimuksen mukaan biohiilen käyttöönotto edellyttäisi merkittäviä tukitoimia ensimmäisiin tuotantolaitoksiin. Tämän hetken hinnoilla sähkön tuotantotuen vuotuinen lisätarve biohiilelle olisi 4,7 miljoonan euron tasolla ja investointiavustusten tarve yhteensä 40 miljoonaa euroa vuoteen 2015 mennessä.

Vahvistuva kysyntä lisää tarvetta biopolttoaineiden pitkien matkojen kuljetustehokkuuden parantamiseen, ja jotta kysynnän paineisiin voitaisiin vastata, on bioenergiaa oltava valmiita kuljettamaan tehokkaasti pitkiäkin matkoja. Bioenergian

kuljetus ei ole kuitenkaan ollut taloudellisesti kovin kannattavaa suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. Vaihtoehtoisia ratkaisuja fossiilisille polttoaineille on yritetty kehittää jo vuosikymmenten ajan, mutta energiateknisiltä ominaisuuksiltaan biopolttoaineet eivät ole olleet kilpailukykyisiä fossiilisten polttoaineiden rinnalla. Energiateknisten ominaisuuksien lisäksi bioenergia sitoo huomattavia määriä henkilötyövoimaa suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin. /4/.

Kasvihuonekaasujen vähentämistavoitteiden saavuttamiseksi on käyttöön otettu edistämistoimia, kuten energiaverotus, sähköntuotannon tuet sekä päästökauppa, jotka tekevät biopolttoaineiden käytön entistä kiinnostavammaksi ja kannattavammaksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Vero- ja tukipoliittisen ohjauksen tuloksena voimalaitosyritykset ovat kiinnostuneita kivihiiltä korvaavista biopolttoainelasteista, joita voitaisiin käyttää voimalaitoksissa ilman suurempia muutostöitä ja investointeja. /4, 5/.

EU:n tavoitteiden lisäksi myös Kioton sopimuksen myötä on energiaratkaisuissa aloitettu tarkastelemaan valintoja yhä enemmän ympäristön kannalta, vaalien kestävän kehityksen mukaisia toimintatapoja ja – menetelmiä. Yksi ratkaisuvaihtoehto kivihiilen korvaajaksi on uusi biomassasta torrefioimalla eli paahtamalla kehitteillä oleva biohiili. Biohiili on pelletöity torrefioidusta puubiomassasta valmistettu polttoaine, jonka ominaisuudet ovat parempia kuin käsittelemättömän puubiomassan. Biohiilen korkea lämpöarvo ja energiatiheys mahdollistavat taloudellisesti kannattavan ja energiataloudellisesti tehokkaan käytön, kuljetuksen ja varastoinnin. Tavoitteena on, että biohiilen ominaisuudet sallivat pidemmät kuljetusetäisyydet ja kaukaisemmat raaka-ainelähteet sekä mahdollistavat sen käytön fossiilisten polttoaineiden korvaajana. /4/.

Tarkasteltaessa käsittelemättömän biomassan kuljetusta ja varastointia, huomataan sen ominaisuuksien olevan epäsuotuisat energiatehokkaan kuljetuksen kannalta. Biomassan rakenteen heterogeenisyys, korkea kosteuspitoisuus, epätasaiset fysikaaliset ominaisuudet ja matala energiatiheys ovat ongelmana, kun puhutaan biomassan tehokkaasta ja taloudellisesta kuljettamisesta, käsittelystä, varastoinnista ja muuttamisesta bioenergiatuotteiksi. /6/.

Energiatehokkuuden kannalta em. ominaisuuksia voidaan parantaa käsittelemällä biomassaa. Torrefiointi on lupaava keino tuottaa puubiomassasta korkeatiheyksistä polttoainetta, joka on fysikaalisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan tasalaatuista. Tämän vuoksi torrefiointi onkin vartenotettava vaihtoehto biomassan nykyistä tehokkaampaan hyödyntämiseen, pitkän matkan kuljettamiseen sekä pitkäaikaiseen varastointiin. /6/.

Biohiilen tuotantoa ja käyttöä kehitetään kansainvälisesti laajasti, mutta siitä ei ole toistaiseksi käytännön kokemusta suuressa voimalaitosmittakaavassa. Tekes-rahoitteisen TISCO -kehityshankkeen myötä on tarkoitus etsiä vastauksia vielä avoinna oleviin kysymyksiin. Tutkimushankkeen tavoitteena on varmistua torrefiointiteknologian soveltuvuudesta voimalaitosintegraatioon ja suomalaisen puubiomassan jalostamiseen sekä tutkia tällä teknologialla jalostetun biopolttoaineen soveltuvuutta kivihiilivoimalaitoksen polttoaineeksi seospoltossa. /7/.

Tämä diplomityö on osa Helsingin Energian TISCO-Helen – projektia, jonka tavoitteena on selvittää käyttäjän näkökulmasta, kuinka suomalaisesta puubiomassasta valmistettua biohiiltä pelletöidään, kuljetetaan, varastoidaan, käsitellään, jauhetaan ja syötetään kivihiilen pölypolttokattilaan kivihiilen ja biohiilen seospolttotapauksessa Salmisaaren voimalaitoksella. /7/.

Tämä työ on tehty Novox Oy:ssä Helsingin Energialle. Työssä tarkastellaan biohiilen logistiikkaketjun energiataloudellisuutta case-tapauksen asettamien reunaehtojen puitteissa. Case-tapaus käsittää biohiilen kuljetuksen, varastoinnin ja käsittelyn PVO Lämpövoima Oy:n Kristiinankaupungin voimalaitoksen alueelle toteutettavaksi suunnitellulta tuotantolaitokselta Helenin Salmisaaren voimalaitokselle.

Tämän työn tavoitteena on löytää energiataloudellisesti kannattavin käsittely- ja logistiikkaketju biohiilelle, ottaen huomioon sen ominaisuudet ja case-tapauksen asettamat maantieteelliset ja tapauskohtaiset reunaehdot kuljettamiselle. Työn tutkimusmenetelminä käytetään sekä kirjallisuus- että case -tapaustudkimusta. Kirjallisuustutkimuksen perusteella luodaan yleiskatsaus aiheesta ja siihen vaikuttavista osa-alueista. Kirjallisuusosuudessa käsitellään torrefioinnilla saavutettavia puubiomassan kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia ja niiden vaikutuksia käsittely- ja

logistiikkaketjuun. Kirjallisuustutkimuksen pääasiallisia lähteitä ovat aiheeseen liittyvät perusteokset ja tieteelliset artikkelit.

Hankkeen puitteissa tehdyt tutkimustulokset ja selvitykset toimivat kirjallisuuden lisäksi materiaalina ja perusaineistona kokeellisessa osuudessa. Asiantuntijahaastattelut ovat myös hyvin suuressa osassa tässä työssä. Logistiikkaketjun energiataloudellisessa arvioinnissa käytetään tarkastelumallia, jonka avulla lasketaan energiakulutukset eri kuljetus- ja käsittelyketjun vaiheille. Energiatalouden lisäksi tarkastellaan kuljetusketjun kustannuksia ja biohiilen tiheyden muutoksien vaikutusta kokonaiskustannuksiin.

2. BIOHIILI

2.1 Taustaa

Biohiili on lupaava kehitteillä oleva polttoainetuote, jonka uskotaan kehittyvän lähivuosina merkittäväksi voimalaitospolttoaineeksi. Biohiiltä voidaan valmistaa puuperäisistä materiaaleista tai muista kasvibiomassoista paahtamalla. Biohiili on tällä hetkellä erittäin voimakkaan kiinnostuksen kohteena ja sen valmistusprosessin kehittämiseen sijoitetaan maailmanlaajuisesti merkittäviä tutkimusmääriä. Biohiiltä ei kuitenkaan toistaiseksi valmisteta kaupallisesti. /8/.

Biohiilen ominaisuudet poikkeavat huomattavasti käsittelemättömän biomassan ominaisuuksista. Biohiilen ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran riippuen raaka-aineesta ja erityisesti paahtoasteesta. Biohiilen ominaisuuksilla on merkitystä erityisesti logistiikan energiataloudellisuuden näkökulmasta, eli paljonko tilaa ja energiaa tarvitaan biohiilen siirtämiseen ja varastointiin verrattuna muihin yleisesti tunnettuihin polttoaineisiin. Aikaisempien tutkimusten perusteella biohiili olisi jauhettavissa voimalaitosten hiilimyllyillä samaan tapaan kuin kivihiili ja laitoksilla ei tarvittaisi oleellisia muutoksia biohiilen käyttöönottamiseksi. /3, 8/.

Viime vuosina biomassan torrefiointia ja pelletointia ovat erityisesti tutkineet Patrick Bergman, Wolfgang Stelte DTI:stä sekä Jacob Kiel ECN:stä. Erityisesti mainittakoon ECN:n Kiel, sillä hän on ollut uran uurtajana torrefiointitekniikan tieteellisessä tutkimuksessa. ECN oli ensimmäisten joukossa huomaamassa torrefiointin potentiaalin biomassan muuttamisessa energiakäyttöön.

VTT:n tekemässä työ- ja elinkeinoministeriön tilaamassa selvityksessä /3/ on esitelty teknisiä mahdollisuuksia kivihiilen korvaamiseen yhteistuotannon pölypolttokattiloissa erityyppisillä biomassoilla ja niistä valmistetuilla jalosteilla. Tutkimuksen mukaan biohiilen vuotuiset käyttökustannukset olivat 20 % korkeammat suhteessa vertailutapauksena käytettyyn kivihiileen. Suurin kustannusten lisäys muodostuu biopolttoaineen ostosta, jonka osuus on noin 60 %. Tämän hetkinen biohiilen hinta on luokkaa 35 €/MWh, ja jotta muuttuvat ja kiinteät käyttökustannukset pysyisivät samalla tasolla kuin kivihiiltä käytettäessä, biohiilestä voitaisiin ilman tukitoimia maksaa vain 21 €/MWh. Kustannusten jakautuminen IEA:n World Energy Outlookin (2010)

vuodelle 2020 esittämän hintakehityksen mukaisesti parantaa kaikissa vaihtoehtoissa biohiilen kilpailukykyä. Vuonna 2020 kivihiilen hinnan on arvioitu laskevan ja päästöoikeuden hinnan nousevan. Vuoden 2020 tilanteessa biohiilestä mahdollisesti maksettava hinta kasvaisi noin 2 €/MWh – ollen noin 23 €/MWh.

Kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen on yksi tärkeimpiä biohiiltä puoltavia tekijöitä. Puunbiomassan energiakäytöllä pyritään vähentämään energiantuotannon ilmastomuutosta aiheuttavien kaasujen päästöjä ja kasvattamaan uusiutuvien energialähteiden osuutta energiantuotannossa. /9/.

Viimeaikaisen tutkimuksen mukaan /10/ biohiilen (134 kg CO₂-ekv./MWh) elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt ovat kivihiileen (396 kg CO₂-ekv./MWh) vastaaviin hiilidioksidipäästöihin verrattuna noin 3 kertaa pienemmät. Laskennassa on otettu huomioon biohiilen elinkaaren aikana metsien hiilivarastojen vähenemisen, tuotannon, kuljetuksen, varastoinnin, polton sekä sähkön että lämmön tarpeen aiheuttamat päästöt ja vastaavasti kivihiilellä kuljetuksesta, varastoinnista sekä poltosta aiheutuvat. Voimalaitoksen hiilijalanjälki pienenee noin 211 000 t CO₂-ekv korvattaessa kivihiilen ja biohiilen yhteispoltossa kivihiilen osuudesta 100 000 t/a biohiilellä. 100 vuoden aikavälillä hiilivaraston muutokset on päästösäästö 162 000 t ja 20 vuoden aikavälillä 89 000 t CO₂-ekv.

2.2 Puubiomassa

Puubiomassa koostuu kuiva-aineesta, tuhkasta ja puuhun sitoutuneesta vedestä. Yleisesti tuoreen puun kosteus on tavallisesti 40–50 %, riippuen kasvukaudesta ja ilmastollisista olosuhteista. Kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on tavallisesti alle 0,5 %, hakkuutähdehakkeella ja havupuun kuorella tuhkapitoisuus on hieman korkeampi, kuitenkin alle 2 %. Puun tuhkapitoisuus on tavallisesti pienempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden, mikä vähentää tuhkan käsittelykustannuksia. Puun kuiva-aines koostuu orgaanisista komponenteista, puupolymeereistä ja uuteaineista. Nämä puupolymeerit eli rakenteelliset komponentit ovat selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Puun rungon kuiva-aine sisältää noin 40 % selluloosaa, 25–35 % hemiselluloosaa, 20–30 % ligniiniä, uuteaineita alle 5 % ja epäorgaanisia aineita alle 0,5 %. /11, s. 16/.

Taulukosta 1 nähdään koivun ja männyn keskimääräiset kemialliset koostumukset sekä niiden erot. Havu- ja lehtipuut sisältävät lähes saman verran selluloosaa, noin 40 %. Lisäksi puubiomassan selluloosan koostumus on samanlainen kaikilla puulajeilla. Hemiselluloosan ja ligniinin rakenteet ovat kuitenkin erilaisia havu- ja lehtipuiden välillä. Havupuut sisältävät lehtipuita vähemmän hemiselluloosaa ja enemmän ligniiniä. Koostumukset vaihtelevat hieman puulajin, iän, kasvuolosuhteiden sekä puun osan mukaan. /11, s. 16/.

Taulukko 1. Männyn ja koivun kuiva-aineiden kemialliset koostumukset (%) puun kuiva-aineesta. /11, s. 16/.

	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini	Uuteaineet
Koivu	40	30–35	20–25	< 5
Mänty	40	25–30	25–30	< 5

Luonnossa hemiselluloosa sitoo ligniinin ja selluloosakuidut antaen biomassan soluseinälle joustavuutta. Hemiselluloosat säätelevät ligniinin ohella puun soluseinien vesipitoisuutta ja sen veden adsorptiokapasiteetti on rakennepolymeereistä suurin. /10/. Soluseinän ja kuitujen elastisuus riippuukin paljolti hemiselluloosien kyvystä sitoa vettä. Havu- ja lehtipuiden hemiselluloosan koostumus ja rakenne poikkeavat toisistaan. Havupuissa on tyypillisesti enemmän mannoosia ja galaktoosia, ja vähemmän ksyloosia ja asetyloituja hydroksyyli ryhmiä kuin lehtipuissa. /11, s. 83/. Ligniini on amorfinen polymeeri. Ligniini on hydrofobinen ja se säätelee puubiomassan sisäistä vesipitoisuutta yhdessä hemiselluloosien kanssa. Ligniini sitoo solut toisiinsa. /11, s. 94/.

Puubiomassa sisältää lisäksi pienen määrän erilaisia uuteaineita, jotka aikaansaavat puulajien luonteenomaisen värin ja hajun. Uuteaineiden koostumus vaihtelee laajasti puulajista riippuen. Uuteaineita ovat fenoliset yhdisteet, terpeni (pihka) ja vahat, rasvat sekä rasvahapot. Monet uuteainekomponentit suojaavat puuta mikrobiologisilta vaurioilta. Uuteaineet voivat pehmittää ligniiniä ja siten ne toimivat myös soluseinän pehmentäjinä. /11, s 96/.

2.3 Torrefiointiprosessi

Biohiili valmistetaan torrefioimalla eli paahtamalla puubiomassaa. Biomassan torrefiointi on kuivatislauksen kaltainen prosessi, joka tapahtuu keskimäärin 200–300 °C lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Hapettomuudesta johtuen prosessissa ei tapahdu palamisreaktioita ja biomassan rakenteen hajoamisreaktiot ovat suhteellisen hitaita. Torrefiointia käytetään muuttamaan erityyppisiä lignoselluloosapohjaisia biomassalaatuja energiatiheäksi homogeeniseksi kiinteäksi tuotteeksi. /12/.

Kuvassa 1 nähdään eri lämpötiloissa torrefioitua kuudesta valmistettua biomassaa. Torrefiointilämpötilat ovat 250, 275 ja 300 °C, mikä huomataan värin muutoksena biomassassa. Värin muutos johtuu pääasiassa kemiallisista muutoksista ligniinissä, lähinnä karbonyyliryhmien lisääntymisestä. /13/.

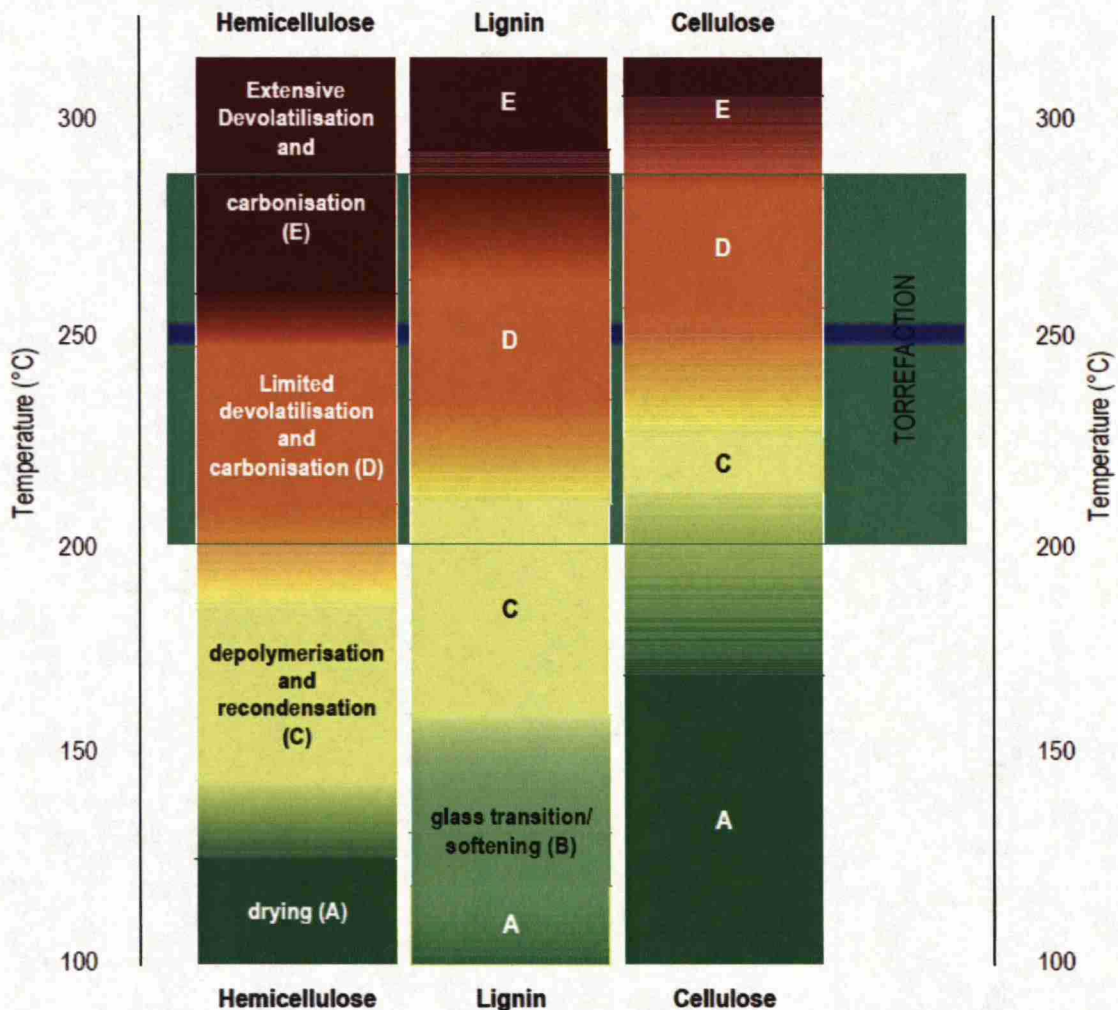


Kuva 1. Biomassan värin muutos torrefioinnin aikana. /13/.

Kirjallisuudessa esiintyy kaksi torrefioinnin tuotantosuuntaa: lähellä käyttö-paikkaa ja samalla kaukana raaka-ainelähteestä tai kaukana käyttöpaikasta ja lähellä raaka-ainelähdettä tapahtuva tuotanto. Tällä hetkellä tutkimus ja suunnittelu keskittyvät jälkimmäiseen, sillä lyhyt raaka-aineen kuljetusmatka ja kustannussäästöt energiativiin biohiilen kuljetuksessa ovat torrefiointimenetelmän keskeisiä etuja. Lisäksi torrefiointiprosessin integrointi sähkön- ja lämmöntuotantoon on etu molemmissa tuotantovaihtoehtoissa. /14 – 16/.

Biomassan rakennepolymeerit hajoavat ja muuttuvat torrefioinnin aikana lämpötilan vaikutuksesta (Kuva 2). Lignoselluloosassa esiintyy lukuisia erilaisia hajoamisreaktioita, joiden mekanismit ja järjestys on ryhmitelty muutamaaan pääilmiöön (A – E) lämpötilatasojen mukaisesti, jossa

- | | | |
|---|---|------------------------|
| A | Biomassan kuivuminen (yli 100 °C) | |
| B | Ligniinin pehmeneminen | |
| C | Depolymerisaatio ja uudelleen kondensoituminen | |
| D | Osittainen devolatilisaatio ja karbonisaatio (yli 200 °C) | } Torrefiointin aikana |
| E | Pitkälle edennyt devolatilisaatio ja karbonisaatio (yli 250 °C) | |



Kuva 2. Torrefiointin aikana lignoselluloosapohjaiselle puubiomassalle tapahtuvat pääfysikaalis-kemialliset hajoamisilmiöt. /16/.

Biomassan rakenteeseen sitoutuneen veden asteittainen kuivuminen alkaa jo lämpötilan ylittäessä 100 °C. Muutoksien voimakkuudet vaihtelevat rakennusaineesta ja muutosilmiöistä toiseen ja ne ovat asteittaisia. Erityisesti hajoamisreaktiot (D – E) ovat ymmärrettävä hitaasti etenevänä prosessina. Lisäksi biomassan rakennemuutosten

tarkastelussa tulee ottaa huomioon, että jokaisen polymeerin hajoamisreaktiot tapahtuvat eriaikaisesti. Kuvassa 2 on esitetty hajoamisilmiöiden lisäksi myös vihreä torrefioinnin lämpötila-alue, jonka sininen viiva jakaa matalaan (200 - 250 °C) ja korkeaan (250 – 290 °C) lämpötila-alueeseen. /12, 16/.

2.3.1 Hemiselluloosa

Hemiselluloosan kohdalla muutokset ovat melko voimakkaita ja muutosten lämpötila-alueet ovat kapeita. Hemiselluloosan rakenteessa alkaa tapahtua muutoksia heti lämpötilan noustessa lähelle 150 °C. Hemiselluloosapolymeereissä ilmenee depolymeroitumista ja uudelleenkonsoitumista (C), jolloin ensin polymeerit hajoavat monomeereiksi, jonka jälkeen ne liittyvät uudestaan kiinteäksi rakenteeksi. /12, 16/.

Matalalla torrefiointilämpötila-alueella biomassan pääasiallinen rakenteellinen hajoaminen aiheutuu vain hemiselluloosan osittaisesta hajoamisesta eli devolatilisaatiosta ja karbonisaatiosta (D), jossa hemiselluloosa hajoaa muodostaen volatiileja yhdisteitä ja kiintoaineeseen jääviä paljon hiiltä sisältäviä yhdisteitä. Volatiilit yhdisteet voidaan jakaa konsoituviin ja ei-konsoituviin yhdisteisiin. Konsoituvat yhdisteet ovat pääasiallisesti vettä ja orgaanisia happoja, kun taas ei-konsoituvat yhdisteet sisältävät pääasiassa hiiliyhdisteitä, kuten häkää ja hiilidioksidia (CO ja CO₂). /12, 16, 17/.

Korkeammassa lämpötila-alueessa puolestaan hajoaminen voimistuu hemiselluloosan hajotessa kokonaan volatiileiksi yhdisteiksi sekä hiilenkaltaiseksi kiinteäksi tuotteeksi (E). Yleisesti tutkimuksissa /16, 17/ on huomattu, että hemiselluloosan hajoamisreaktiot kiihtyvät lämpötilan noustessa 240 asteesta 280 °C:een. Torrefiointi lämpötiloissa 225–300°C perustuu siis lähinnä hemiselluloosan hajoamiseen.

Hemiselluloosan rakennemuutoksia tukevat myös toiset tutkimukset. Tutkimuksessa /13/ kuusen hemiselluloosan osuus pienentyi noin 23 %:sta 6 %:iin eli noin 30 % alkuperäiseen hemiselluloosapitoisuuteen nähden, kun biomassan torrefiointilämpötila oli 250 °C. Kun lämpötilaa nostettiin 275 asteeseen, hajosi hemiselluloosa lähes täysin, laskien jopa 0,7 % kokonaisuuteen saakka. Torrefioinnin aikana puubiomassan rakenteesta hajoaa lähinnä hemiselluloosa.

Hemiselluloosan reaktiivisuus riippuu huomattavasti sen molekylaarisesta rakenteesta sekä kokonaisuuden määrästä puubiomassassa, joka vaihtelee suuresti lehti- ja havupuiden välillä. Kemiallisten erojen takia lehtipuut ovat reaktiivisempia, joka ilmenee huomattavasti nopeampana devolatilisaationa ja karbonisaationa verrattuna havupuihin. /12, 16, 17/.

Tutkimuksissa /12, 16, 17/ on huomattu, että hemiselluloosan ksylaani on ainesosista reaktiivisin ja alkaa hajota heti lämpötilan noustessa yli 200 °C. Lehtipuiden hemiselluloosa sisältää enemmän ksylaania (15–30%) kuin havupuiden (7–10 %). Havupuiden hemiselluloosa on lähinnä glukomannaania, joka reagoi huomattavasti vähemmän lämpötilan nousuun. Lehtipuut sisältävät keskimäärin 10 % enemmän hemiselluloosaa kuin havupuut ja tämä ero huomataan torrefioinnin aikana lehtipuiden korkeampina massahäviöinä. Korkeammat massahäviöt korreloivat myös korkeamman energiatihedyyden kanssa; lehtipuiden energiatiheys kasvaa huomattavasti (noin 17 %) enemmän kuin havupuut (7 %), torrefiointiolosuhteiden ollessa 270 °C ja 15 min.

Lehtipuulajit sisältävät ksylaanin lisäksi myös enemmän vettä verrattuna havupuulajeihin, jolloin myös torrefioinnissa muodostuu enemmän volatiileja yhdisteitä. Volatiilien yhdisteiden suurempi haihtuminen suhteessa havupuihin tarkoittaa samalla suurempia massahäviöitä. /12, 16, 17/.

2.3.2 Ligniini

Ligniini kestää paremmin pitkiä lämpökäsittelyjä kuin hemiselluloosa. Ligniinillä muutokset tapahtuvat laajemmalla lämpötila-alueella ja tarkat lämpötilamuutokset riippuvat biomassan laadusta ja ominaisuuksista. /12, 16/. Torrefioinnin aikana hemiselluloosan hajoamisen vuoksi ligniinin osuus kasvaa biomassassa. Tutkimuksissa /12, 13, 17/ on huomattu, että ligniinin osuus voi kasvaa jopa 10–15 %.

Ligniinin pehmentyminen on yksi tärkeimmistä ilmiöistä, koska sen sidosaineominaisuudet ovat kriittisiä pelletöinnin kannalta. Yleisesti on tunnettua, että puupellettien pelletöintiprosessissa pääsidoksina on pidetty vetysidoksia ligniinin ja hemiselluloosan välillä. Ligniinin pehmenemistä on tutkittu paljon sekä lisäksi erityisesti sen vaikutusta puubiomassan pelletöintiin. /12/.

Ligniinillä rakenteen pehmenemistä (B) alkaa esiintyä lämpötilan ylittäessä 100 °C. Matalalla torrefiointilämpötila-alueella ligniinin rakenteessa on havaittavissa depolymerisaatiota ja uudelleenkonzensoitumista (C) eli pienimuotoista hajoamista ja muuntumista. Vasta korkeammissa torrefiointilämpötiloissa (yli 250 °C) ligniinin rakenne hajoaa (D ja E) asteittain, jolloin sen toiminta sidosaineena alkaa heiketä, joka vaikeuttaa pelletointia. /12, 16/.

Lämpötilan nousun vaikutuksesta ligniinin rakenne pehmenee, sen amorfisten molekyylien energia kasvaa ja rakenteessa esiintyy enemmän vapaata tilaa, jolloin molekyylien väliset sidokset pääsevät vapaasti liikkumaan ja kiertymään oman akselinsa ympäri. Ligniinistä tulee joustavampi ja sen olomuoto muuttuu lasimaisesta kumimaiseksi. Jos ligniinin lasinmuutoslämpötila ylitetään, jonka jälkeen lämpötilan laskiessa takaisin alle lasisiirtymälämpötilan, muuttuu rakenne hauraaksi ja lasimaiseksi. Tämä olomuodonmuutos on palautumaton ja pelletoinnissa se huomataan heikentyneenä mekaanisena kestävyysnä. Ligniinin lasisiirtymälämpötilaan voidaan vaikuttaa kosteuden avulla. Pehmentimen vaikutuksesta polymeeriketjujen väliset voimat heikkenevät ja lasisiirtymälämpötila saavutetaan aikaisemmin. /12, 18/.

2.3.3 Selluloosa

Lämpötilan nousu vaikuttaa puun rakenneaineista viimeisenä selluloosaan. Selluloosa kestää muita rakenneaineita paremmin lämpöä ja se hajoaa paljon hemiselluloosaa myöhemmin. Selluloosa onkin biomassan polymeereistä lämpöstabiilein, vastustaen siis palautumattomia kemiallisia ja fysikaalisia rakennemuutoksia eniten. Selluloosan on huomattu depolymerisoituvan ja uudelleen konzensoituvan (C) matalissa lämpötiloissa, mutta sen hidas hajoaminen (D) alkaa vasta noin 270 °C lämpötilassa. Laajamittainen hajoaminen (E) kuitenkin etenee nopeasti lämpötila lähestyessä 300 °C. /13, 17/.

2.3.4 Paahtokaasut

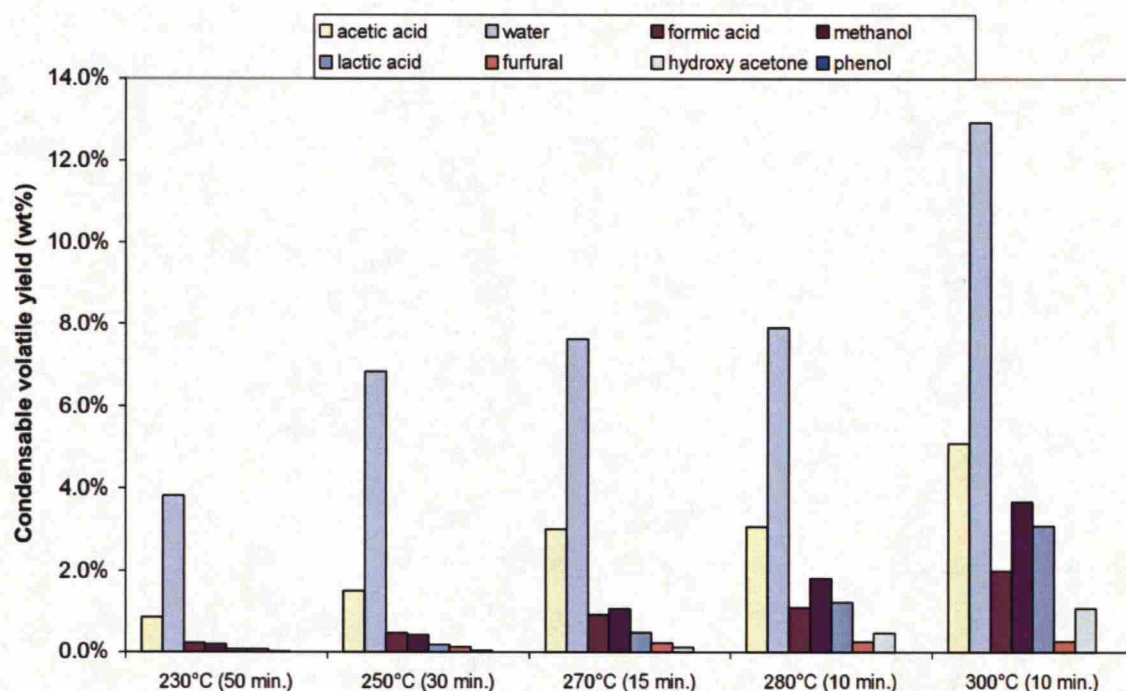
Paahtokaasuiksi kutsutaan osaa torrefioinnissa muodostuvista kaasuista, jotka sisältävät hyödynnettävissä olevaa kemiallista energiaa. Tuotantoprosessin tehokkuuden kannalta tällaisten energiapitoisten sivutuotteiden jälleenhyödyntäminen on tavoiteltavaa. /20/.

Tutkimuksessa /15, 16/ on esitetty konsepti (*eng. autothermal operation*), jossa biomassan kuivatukseen ja torrefointiin tarvittava energia saataisiin paahtokaasuista.

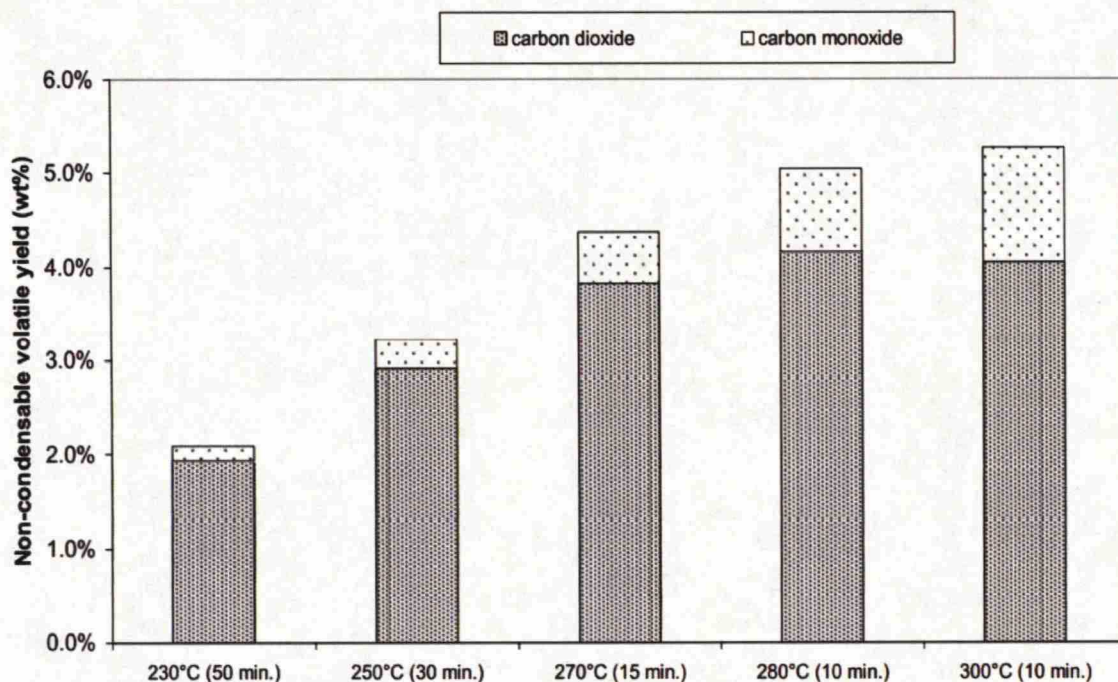
Paahtokaasujen liian pieni energiamäärä vaatii lisäenergiaa torrefioinnissa, kun taas liian suuri energiamäärä aiheuttaa turhia hyödyntämättömiä massa- ja energiahäviöitä. Yleisesti hyvänä massa- ja energiasaantona on pidetty puubiomassalle vastaavasti 70 % ja 90 %. Massa- ja energiasaannosta on kerrottu lisää kappaleessa 2.4.1.2.

Torrefioinnin aikana biomassasta haihtuu orgaanisia yhdisteitä, jotka ovat hyvin reaktiivisia ja ihmiselle vaarallisia. Torrefiointiprosessin paahtokaasujen kemiallinen koostumus riippuu käytetystä biomassasta. Paahtokaasut voidaan jakaa kiinteisiin ja kaasumaisiin yhdisteisiin. Kaasumaiset yhdisteet voidaan jakaa tavanomaisissa ympäristön lämpötiloissa nesteytyviin ja ei-nesteytyviin kaasuihin. /21/.

Torrefiointilämpötila korreloi suoraan volatiilien yhdisteiden haihtumisen määrään, kuva 3 ja 4. Karboksyyliyhdisteiden lämmittämisestä syntyy karbonyyleja, kuten metanolia, propionaldehydiä ja muita hiilivetyjä. Nestemäiseksi tiivistyvien kaasujen määriltään suurimmat pääryhmät ovat vesi, orgaaniset hapot ja rasvat. Paahtokaasujen analyysitutkimuksista /21, 22/ on löydetty mm. maito- ja muurahaishappoa, furfuraalia, hydroksyyliasetonia ja metanolia. Myös fenoleja on löydetty, etenkin korkeissa torrefiointilämpötiloissa. Ei-nesteytyvät kaasut, kuten hiilimonoksidi ja hiilidioksidi, syntyvät pääasiassa hemiselluloosan hajoamisessa vapautuneesta hapesta.



Kuva 3. Nesteytyvät paahtokaasut paahtoasteen funktiona. /22/.



Kuva 4. Ei-nesteytyvät paahtokaasut paahtoasteen funktiona. /22/.

Torrefiointilämpötilojen ylittäessä 300–320 °C voi selluloosan lämpökraukkaudesta muodostua tervaa, jolloin paahtokaasujen seassa saattaa esiintyä myös terveydelle haitallisia PAH-yhdisteitä, kuten bentseeniä, indeeniä, naftaleenia, asenaftyleeniä, antraseeniä, fenantreeniä ja pyreeniä. Nämä PAH -yhdisteet ovat seurausta epätäydellisestä palamisesta, minkä vuoksi on suositeltavaa pitää torrefiointiolosuhteet alle 300 asteessa. /17, 23/.

2.3.5 Paahtoaste

Torrefiointiajalla ja -lämpötilalla on merkittävä vaikutus biomassan rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Paahtoaste kuvaa paahtoprosessin lämpötilan ja viipymääjan yhteisvaikutusta, joka tyypillisesti tapahtuu lämpötilassa 200-300°C ja on kestoltaan noin 15–60 minuuttia. Paahtoaste kuvaa lopputuotteen laatua, sitä miten pitkälle orgaaniset aineet ovat käsittelyssä hajonneet ja haihtuneet biomassasta. Yleisesti puhutaan vaaleasta ja tummasta paahdosta. /8/.

Useiden tutkimuksien mukaan paahtoaste on tärkein parametri, kun tarkastellaan mm. torrefioinnissa aiheutuvia massahäviöitä, hiilipitoisuuden ja lämpöarvon muutoksia, tämän lisäksi paahtoaste vaikuttaa myös biohiilen jauhautuvuuteen ja pelletöitävyyteen.

Paahtoaste on siis erittäin kriittinen prosessiparametri, kun tarkastellaan käsittelemättömän biomassan muuttamista polttoaineeksi. /24/.

Paahtoasteella on merkittävä vaikutus biohiilen lämpöarvoon. On huomattu, että mitä tummempi paahtoaste, sitä suurempi lämpöarvon kasvu torrefioinnin aikana. Tutkimuksen /20/ mukaan voidaan saavuttaa jopa 20 % lämpöarvon kasvu.

Biohiilen herkkyys muodostaa pölyä sitä mekaanisesti käsiteltäessä kasvaa lineaarisesti paahtoasteen tummentuessa. Pölyäminen on erittäin tärkeää huomioida turvallisuus- ja terveyskysymyksiä tarkasteltaessa, erityisesti kun pohditaan kuljetus- ja varastointiolosuhteita. Biohiilen ominaisuuksien paloturvallisuuskysymyksiä tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 3.3.

Paahtoastetta ei voi kuitenkaan määritellä suoraviivaisesti esimerkiksi lämpötilan ja paahtoajan funktiona, koska lämpötilan vaikutus on erilainen kuin viipymääjan, eikä se ole lineaarinen. Tutkimuksen /25/ mukaan torrefiointilämpötila on dominoivampi kuin viipymäaika, mikä on syytä huomioida kun pohditaan biohiilen ominaisuuksia ja torrefiointiprosessin olosuhteiden säätöjä niin tuotanto- että voimalaitoksen kannalta.

Viipymääjalla on kuitenkin merkitystä, koska lyhyillä viipymääjoilla hajoamisreaktiot eivät ehdi tapahtumaan loppuun saakka, jolloin paahtoajan pituudella on selkeästi merkitystä biohiilen laadun kannalta. Energiataloudellisesti torrefiointiprosessia tarkasteltaessa toivotuin toimintaikkuna paahtoasteen tummuuden suhteen edellyttää toimimista kuitenkin lyhyillä viipymääjoilla ja lämpötiloilla 250–300 °C. Tämä tarkoittaa sitä, että biohiilen tuotannon energiankulutus ja käytöstä saatu polttoaine-energian hyötysuhde on mahdollisimman korkea. /12/.

2.4 Polttoaineominaisuudet

Puubiomassan torrefiointi parantaa sen polttoaineominaisuuksia huomattavasti ja biohiilen energiatekniset ominaisuudet poikkeavat muista tavallisesti käytetyistä polttoaineista. Taulukosta 2 nähdään biohiilen polttoaineominaisuuksia suhteessa muihin polttoaineisiin.

Taulukko 2. Polttoaineiden ominaisuuksien vertailu. /3, 26, 27/.

		Puuhake	Biohiili pelletöimätön	Puupelletti	Biohiili pelletöity	Kivihiili
Kosteus	%	35–45	~3	7–10	1–5	5–10
LHV (saap.tila)	MJ/kg	7,5–10,5	19,9	15,6–16,2	19,9–21,6 21*	23,6–26,1 26*
LHV (kuiva)	MJ/kg	17,7–19,3	20,4	17,7	20,4–22,7	26,0–28,3
Tiheys	kg/i-m ³	250–350	~230	500–650	750–850 600**	900–1000
Energia- tiheys	GJ/i-m ³	2,6–3,1	4,6–5,8	7,8–10,8	14,9–18,5 13**	19,8–21,6

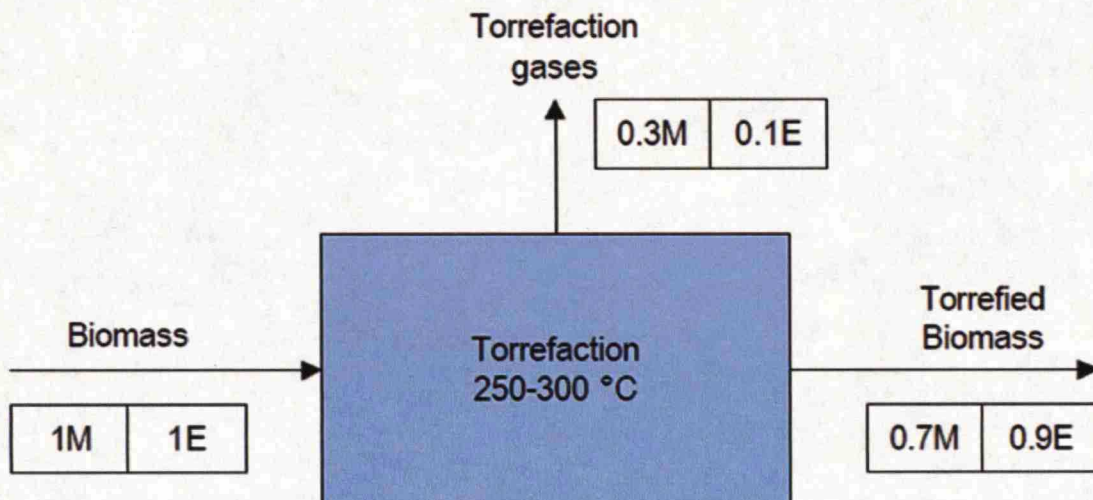
* Työssä käytetyt arvot

** Työssä käytetyt ja kirjallisuudesta poikkeavat arvot

2.4.1 Massa- ja energiatase

Torrefioinnin aikana biomassa hajoaa osittain johtuen prosessin aikana biomassasta haihtuvista volatiileista yhdisteistä. Torrefioinnin aikana biomassasta haihtuvat pääasiassa matalan lämpöarvon volatiilit yhdisteet, kuten vesihöyry ja hiilidioksidi, jolloin biomassasta poistuu suhteessa enemmän massaa kuin energiaa. /17/.

Torrefioinnin aikana haihtuneet yhdisteet huomataan biomassassa massa- ja energiahäviöinä. Torrefioinnin vaikutuksia massa- ja energiasaantoihin on tutkittu /28–30/ paljon ja on huomattu, että massahäviöt ovat suurempia energiahäviöihin verrattuna. Tutkimuksien /16, 20/ mukaan torrefioidun puubiomassan lopputuote sisältää keskimäärin 70 % alkuperäisestä massasta ja 90 % alkuperäisestä energiasisällöstä, kuva 5. Biomassan energiasisältö pienenee siis vain hieman suhteessa massahäviöihin.



Kuva 5. Torrefiointiprosessin massa- ja energiataseet. /13/.

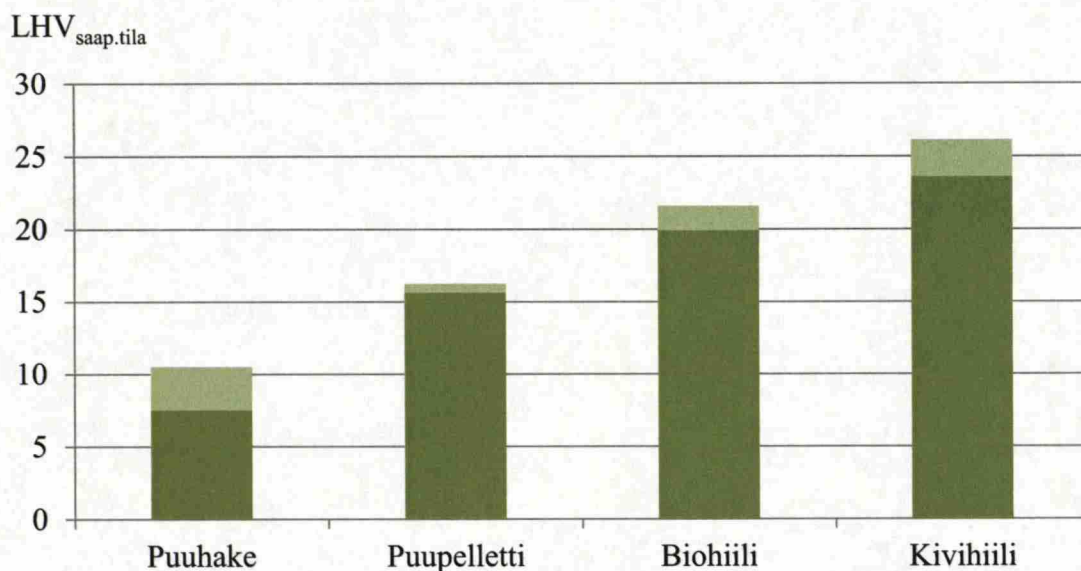
Massa- ja energiahäviöt korreloivat lineaarisesti torrefiointilämpötilan kanssa. Mitä pidemmälle torrefiointi etenee, sitä enemmän massa- ja energiahäviöitä syntyy. /12, 13, 28/. Rakenteen hajoaminen ja siitä johtuvat massahäviöt tekevät torrefioidusta biomassasta hauraan ja huokoisen, joka huomataan huomattavana tiheyden heikentymisenä. Torrefioidun puubiomassan tiheys voi jopa puolittua verrattuna käsittelemättömään puubiomassaan. /15, 19/.

2.4.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo määrittelee polttoaineen soveltuvuuden polttoainekäytössä ja on tärkein polttoaineominaisuus. Lämpöarvo kuvaa täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpöenergiamäärän polttoaineen massayksikköä kohden (MJ/kg tai kWh/kg). Lämpöarvon avulla voidaan laskea, paljonko polttoainetta tarvitaan tietyn energiamäärän saamiseksi. Usein lämpöarvo ilmoitetaan myös tilavuutta kohti eli energiatihytenä (MJ/m³ tai MWh/m³). /26/.

Voimalaitosten polttoainetoimittajille maksama hinta määräytyy saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvon mukaisesti, joka usein mitataan näytteistä paikan päällä. Näin ollen polttoaineen tasapainokosteuspitoisuudella on suuri merkitys polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Polttoaineen kosteuden merkitys kasvaa, mitä pienemmässä yksikössä polttoainetta hyödynnetään. /20, 26/.

Massa- ja energiamäärien muuttumisen myötä puubiomassan lämpöarvo kasvaa torrefioinnin aikana. Biohiilen lämpöarvo on keskimäärin 30 % korkeampi kuin tavallisten puupellettien, kuva 6. Kivihiilen vastaavia lukuja ei torrefioinnilla kuitenkaan pystytä saavuttamaan, mutta lämpöarvon kasvu on kuitenkin merkittävä verrattuna muihin biopolttoaineisiin.



Kuva 6. Biohiilen alempi lämpöarvo saapumistilassa suhteessa muihin polttoaineisiin. /3, 15, 16, 26, 27/.

2.4.3 Hydrofobisuus ja tasapainokosteuspitoisuus

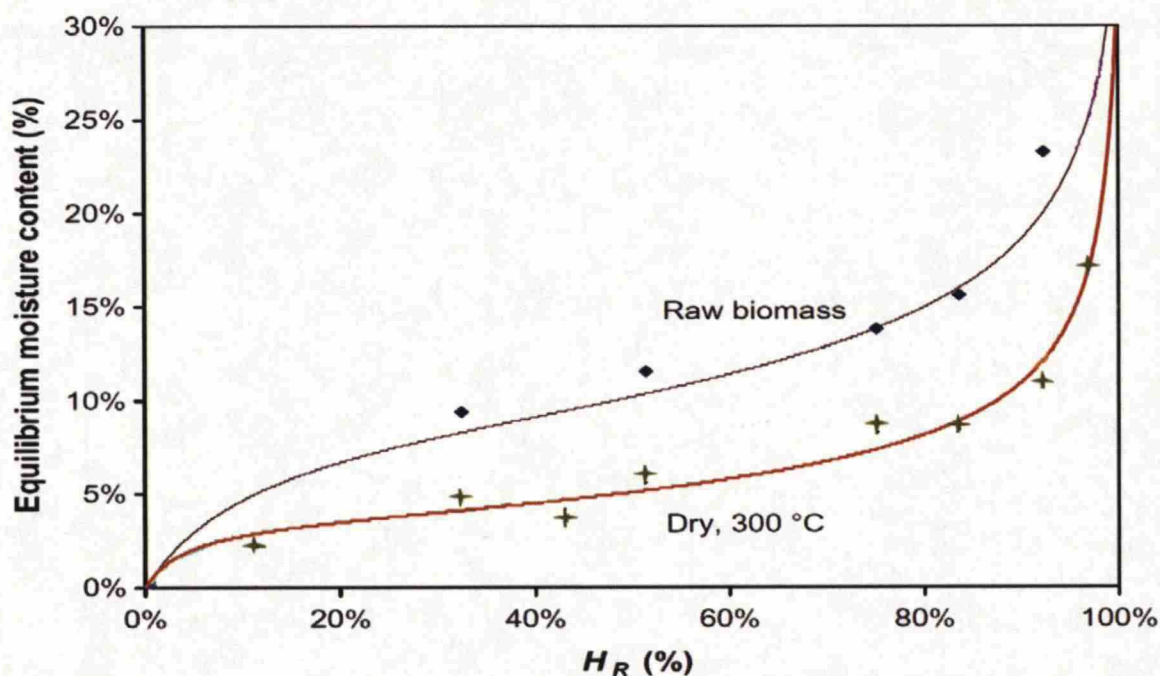
Puubiomassa on hygroskooppista eli sillä on kyky imeä itseensä tai vastaavasti luovuttaa vettä ympäröivään ilmaan. Käsittelemätön biomassa on altis kosteudelle ja sen aiheuttamille biologisille muutoksille hydroksyyliyhymien (OH-) johdosta. Kosteus absorboituu soluseinien lignoselluloosamateriaaleihin sekä niissä sijaitsevien hydroksyyliyhymien vetysidoksiin. /31/. Torrefioinnin aikana biomassa kuivuu ja OH-ryhmät hajoavat, jolloin sen kyky muodostaa vetysidoksia veden kanssa estyy, sen kosteuspitoisuus pienenee ja sen hygroskooppinen luonne muuttuu hydrofobisemmaksi. /12/.

Kutakin lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta (RH) vastaa tietty tasapainokosteuspitoisuus (EMC), jonka puubiomassa saavuttaa ollessaan tasapainossa ympäröivän ilman kanssa. Tällöin siihen saapuu ja siitä lähtee yhtä paljon vettä, eli se

on saavuttanut hygroskooppisen tasapainopisteen. EMC:tä voidaan käyttää kuvaamaan kiinteän aineen hydrofobisuutta. /32/.

Tutkimuksien mukaan /20, 31, 33 – 35 / biohiilen keskimääräisen tasapainokosteuden on huomattu olevan jopa puolet pienempi kuin tavallisten puupellettien. Biohiilen alhainen EMC viittaa biomassan hygroskooppisen luonteen muuttumiseen torrefiointin aikana.

Torrefiointi alentaa biomassan tasapainokosteuspitoisuutta, kuva 7. Biohiilen tasapainokosteuspitoisuus on tavanomaisilla ympäristön suhteellisilla kosteuksilla alle 10 %, kun taas käsittelemättömällä puulla EMC -arvot vaihtelevat 15 – 20 % (RH= 85 %, T= 22 °C). /31, 32, 35/.



Kuva 7. Tasapainokosteuspitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona. /35/.

Lukuisat tutkimukset /27, 31, 36 / osoittavat, että biohiilen hydrofobinen luonne kasvaa torrefiointin aikana, joka huomataan tasapainokosteuspitoisuuden muutoksena, taulukko 3. Taulukosta nähdään, että EMC pienenee torrefiointilämpötilan kasvaessa. Parhaiten se on huomattavissa suurilla suhteellisilla kosteuksilla, jolloin EMC -arvo on noin puolet alkuperäiseen verrattuna. Torrefiointilämpötilalla on siis ratkaiseva merkitys tasapainokosteuspitoisuuteen. Torrefiointilämpötila korreloi hydrofobisuuden kanssa ja

kuten taulukosta 3 huomataan, kosteuden imeytyminen on sitä vähäisempää mitä korkeammassa lämpötilassa torrefiointi on tapahtunut. Tämä tukee myös huomiota, että OH -ryhmien määrä on pienempi tummemmilla paahtoasteilla. /12, 31/.

Taulukko 3. Biomassan tasapainokosteuspitoisuuden muutokset torrefiointilämpötilan funktiona, lämpötilassa 30 °C. /31/.

Torrefiointilämpötila [C°]	EMC [%] RH=11,3 %	EMC [%] RH=83,6 %
-	3,5	15,6
250	2,3	10,4
275	2,2	8,7
300	2,3	8,7

Eri vuodenaikojen myötä ilman kosteuspitoisuus vaihtelee välillä 60 – 90 %, jonka vuoksi tarkka tietämys biohiilen tasapainokosteuspitoisuudesta ja hydrofobisuudesta on tärkeää niin varastoinnin aikana ilmenevien kemiallisten ja fysikaalisten muutosten arvioinnissa että voimalaitoksen toiminnan kannalta. /32/.

Biohiilen matalampi tasapainokosteuspitoisuus ja hydrofobisempi luonne verrattuna puupelletteihin tuo etuja koko käsittelyketjuun. Parhaimmillaan varastointi-infrastruktuuri-investoinnit vähentyvät ja varastohävikki vähenee, saapumistilassa olevan biohiilen lämpöarvo on korkeampi, lisäksi se on kuivempaa ja stabiilimpaa, joka parantaa polton tehokkuutta. /20, 37/.

2.5 Mekaaniset ominaisuudet

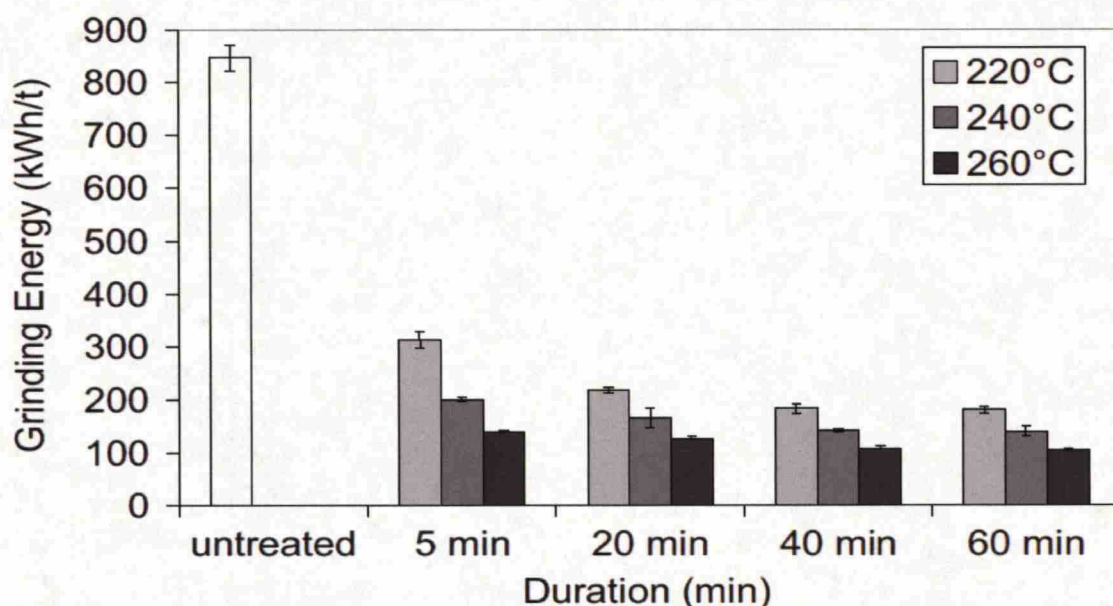
2.5.1 Jauhautuvuus

Biohiilen jauhautuvuus on tärkeä mekaaninen ominaisuus poltettavuuden ja kivihiilen korvaavuuden näkökulmasta. Torrefiointi haurastuttaa puubiomassan rakennetta, mikä huomataan pienempänä jauhatusenergian tarpeena. Biohiilen jauhamiseen kuluva energia on huomattavasti pienempi verrattuna käsittelemättömään puubiomassaan. /10, 12/.

Biomassan kuiturakenteen mekaanisen lujuuden heikentyminen torrefioinnin aikana helpottaa biohiilen jauhamista ennen ja jälkeen pelletöinnin. Etenkin voimalaitospäässä

energiaa säästyy, kun biohiilipelletin jauhamiseen kuluva energia on huomattavasti puupellettien jauhamisenergiasta pienempi. Biohiilen jauhamista on myös tutkittu laajasti ja tutkimuksissa [6, 15, 16, 19, 20, 24] on huomattu puubiomassan jauhamisenergian tarpeen pienenevän jopa 70 – 90 %, riippuen torrefiointiolosuhteista.

Tutkimuksessa [19] huomattiin, että torrefiointiparametreilla on vaikutusta jauhautuvuuteen ja ne korreloivat suoraan jauhamisenergiankulutukseen. Korkeassa paahtoasteessa torrefioitu biohiili on hauraampaa, joka ilmenee matalampana energiankulutuksena jauhamisessa. Tämä tukee myös päätelmää, että viipymäajalla on huomattava vaikutus sekä biohiilen laatuun että jauhautuvuuteen, kuva 8.

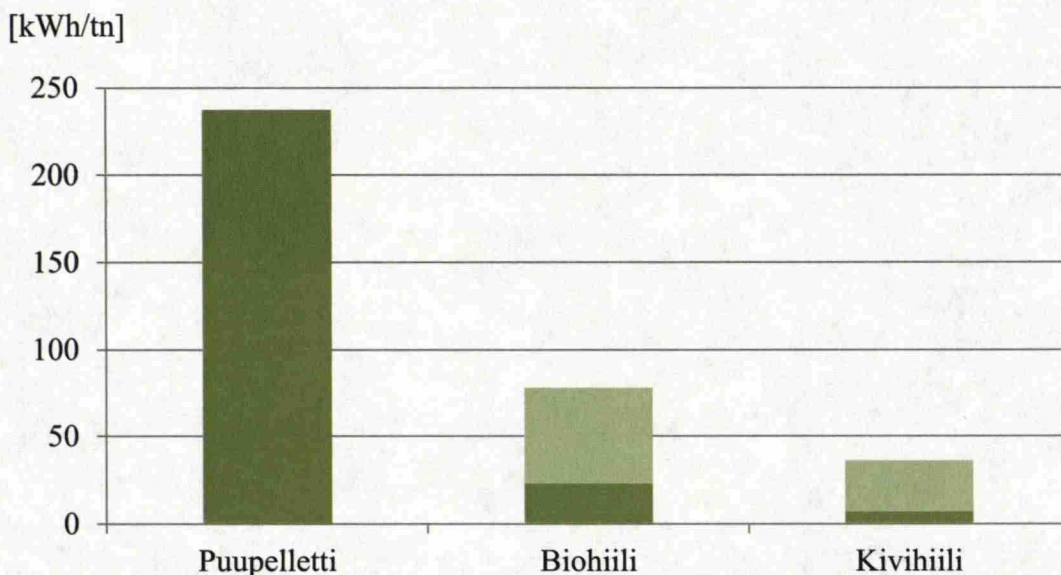


Kuva 8. Viipymäajan vaikutus jauhamisenergian tarpeeseen. [19].

Tutkimuksissa [6, 15, 16, 19, 20, 24] on huomattu, että torrefiointi pienentää jauhamisenergiasta. Tutkimuksen [6] mukaan torrefiointi lämpötilassa 300 °C vähentää jauhamisenergian tarvetta 10-kertaisesti mäntyhakkeella ja 6-kertaisesti hakkuutähteellä, kun verrataan käsittelemättömään puubiomassaan. Lisäksi biohiilen jauhamisenergian tarve vähenee jopa 70 %, kun viipymäaikaa nostetaan 5 minuutista 30 minuuttiin torrefiointilämpötilassa 275–280°C.

Biohiilen jauhautuvuutta ja jauhatusenergian tarvetta usein verrataan puupellettien vastaaviin arvoihin, mutta tämän lisäksi on oleellista verrata niitä myös kivihiilen vastaaviin arvoihin. Kivihiiltä polttavalle voimalaitokselle nämä tiedot ovat arvokkaita

ja ensisijaisesti niihin kiinnitetään huomiota, kun arvioidaan biohiilen soveltuvuutta kivihiilelle tarkoitettuihin jauhatusmyllyihin. Kuvasta 9 nähdään torrefioinnin merkittävä vaikutus jauhautuvuuteen, mutta samalla huomataan, että biohiilen jauhautuvuus ei kuitenkaan ole kivihiilen tasolla.



Kuva 9. Eri polttoaineiden jauhamisenergian kulutus. /6, 19/.

Jauhamisenergian lisäksi biohiilen jauhautuvuutta voidaan testata kivihiilen tavoin Hardgrove – testin avulla. Tulokset ilmoitetaan ns. Hardgrove – indeksinä, joka tulee englanninkielisistä sanoista Hardgrove Grindability Index (HGI). Mitä suurempi indeksi on, sitä helpommin polttoaine jauhautuu myllyssä. Suomessa käytettävän kivihiilen keskimääräinen HGI on 57 ja vaihteluväli 40–60. /26/.

Biohiilen HGI on huomattavasti matalampi karkeasti, luokkaa 20–50. On huomattu, että korkeassa lämpötilassa ja pitkällä viipymäajalla torrefioitujen biohiilen jauhautumisominaisuudet lähenevät kivihiilen HGI -arvoja. Tutkimuksessa /18/ huomattiin myös viipymäajan vaikutus. Tutkimuksessa biohiilen (290 °C) HGI muuttui 24:sta 51:een, kun viipymäaikaa nostettiin 10 minuutista 60 minuuttiin.

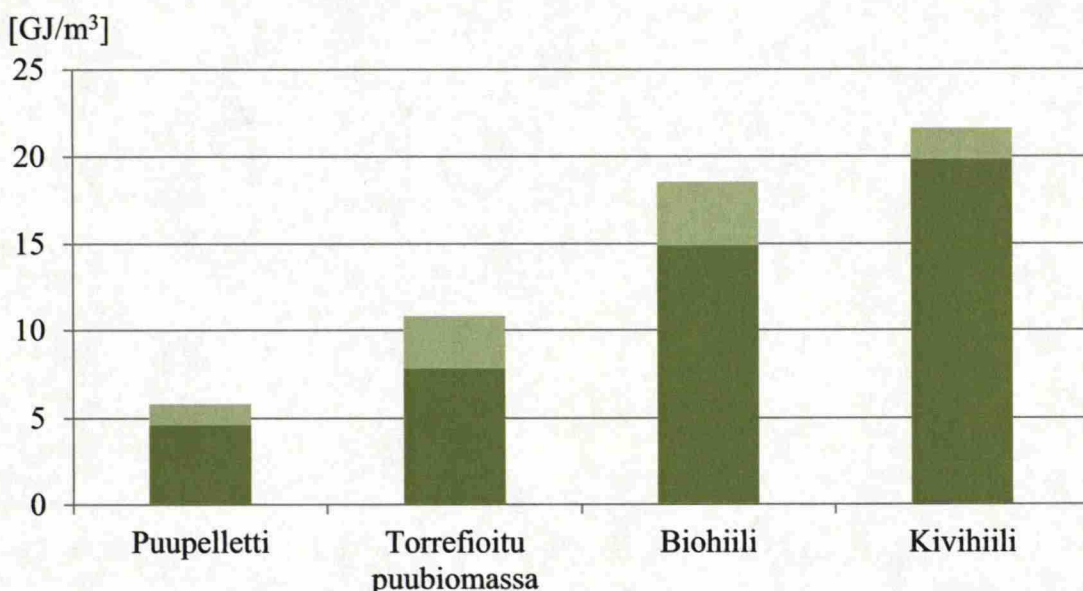
Lisäksi tutkimuksen /38/ mukaan jauhautuvuus paranee huomattavasti massahäviöiden ylittäessä 30 %. Biohiilelle tehtyjen jauhautuvuustestien ja HGI:n perusteella voidaan sanoa, että biohiili tarvitsee enemmän energiaa ja pidemmät jauhatusajat, jotta saavutetaan sama jauhamistulos kuin kivihiilellä. /24/.

2.5.2 Tiivistettävyys

Torrefioinnin vaikutuksesta biohiili on haurasta ja huokoista, jonka vuoksi tiivistäminen on torrefioinnin jälkeen logistiikan tehokkuuden kannalta hyvin tärkeää. Biohiiltä voidaan tiivistää joko pelletöimällä tai briketöimällä. /12, 13, 27, 33/.

Tiivistämisen ansiosta biohiilen tiheys moninkertaistuu, sen muoto sekä koko homogenisoituvat ja pölyn sekä hienoaineksen muodostuminen vähenee, jolloin biohiilen käsiteltävyysominaisuudet paranevat huomattavasti. /8, 12/. Torrefioinnin aiheuttama mekaanisen lujuuden heikentyminen saadaan myös osittain takaisin, kun biohiiltä tiivistetään. /27, 39, 40 /.

Torrefiointi yhdistettynä tiivistämiseen nostaa puubiomassan energiatiheyttä merkittävästi. Kuvasta 10 nähdään, miten biohiilen tiheys suhteutuu muiden polttoaineiden vastaaviin arvoihin.



Kuva 10. Energiatiheyserot eri polttoaineiden välillä. /3, 26, 33/.

Torrefioinnin yhdistäminen tiivistämiseen tuo sekä merkittäviä energiataloudellisia että logistisia etuja; näin saadaan pienemmässä tilassa kuljetettua enemmän energiaa kuin aikaisemmin, joka mahdollistaa pidempien matkojen järkevän ja toteuttamiskelpoisen kuljetuksen. /8, 27, 39, 40/.

Biohiili voidaan tiivistää pelletöimällä tai briketöimällä. Pelletit ovat yleensä pieniä, halkaisijaltaan 8 - 12 mm:n kokoisia, lyhyitä sylinterin muotoisia kappaleita, jotka

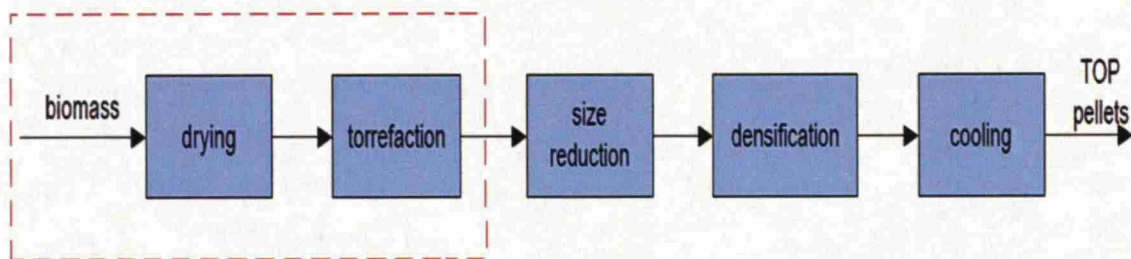
valmistetaan puristamalla torrefioitua puubiomassaa mekaanisesti teräksisen reikälevyn läpi (Kuva 11). /12, 41/.



Kuva 11. Biohiilipellettejä. /8/.

Briketti on halkaisijaltaan huomattavasti isompi, keskimäärin 50 - 70 mm luokkaa. Biohiilen tiivistäminen on keskittynyt pelletöintiin, mutta myös briketöinnin mahdollisuutta on tutkittu. Biohiilibrikettitutkimuksien vähyyden vuoksi tässä työssä keskitytään ainoastaan pelletteihin. Biohiilen briketöinnin lisätutkimus olisi tarpeellista, koska yleisesti tarvitaan lisää tietoa asiasta ja briketöinti saattaisi olla ratkaisu pelletöinnissä esiintyville ongelmille. /39, 40/.

ECN on tutkinut ja kehittänyt yhdistettyä torrefiointi- ja pelletöintiprosessia (*Torrefaction and Pelletisation, TOP*) biomassalle, joka nähdään kuvasta 12. Siinä biomassa kuivatetaan ja torrefioidaan, jonka jälkeen paahdettu puubiomassa jauhetaan ja pelletöidään ilman sideaineita, jolloin saadaan uusi, tavallisista puupelleteistä poikkeava TOP -pelletti. /27/.



Kuva 12. ECN:n kehittämä TOP -prosessi. /27/.

Torrefiointi muuttaa puubiomassan rakennetta, joka huomataan verrattaessa puubiomassan ja biohiilen pelletöintiominaisuuksia. Biohiiltä pelletöitäessä kitka pellettipuristimen matriisissa kasvaa ja pellettien puristuslujuus heikkenee. Lisääntynyt kitkavastus johtuu rakennepolymeerien hajoamisesta torrefioinnin aikana, jolloin luonnolliset voiteluaineet ovat poistuneet puubiomassasta. Kitkan kasvu aiheuttaa pelletöintiprosessiin haastavia teknillisiä ongelmia, mm. tukkeutumista ja ylikuumenemista, jolloin pellettien laatu ja tuotanto heikkenee. /12, 13, 40/.

Käsittlemättömän puun pelletöinnissä ligniini toimii sidosaineena ja sen osuus puun rakenteen koostumuksesta korreloi suoraan pellettien mekaanisten kestävyysominaisuuksien kanssa. Tutkimuksen /33/ mukaan biohiilellä tämä trendi näyttää kuitenkin päinvastaiselta, vaikka torrefioinnin aikana hemiselluloosan hajoamisen vuoksi ligniinin osuus kasvaa biomassassa.

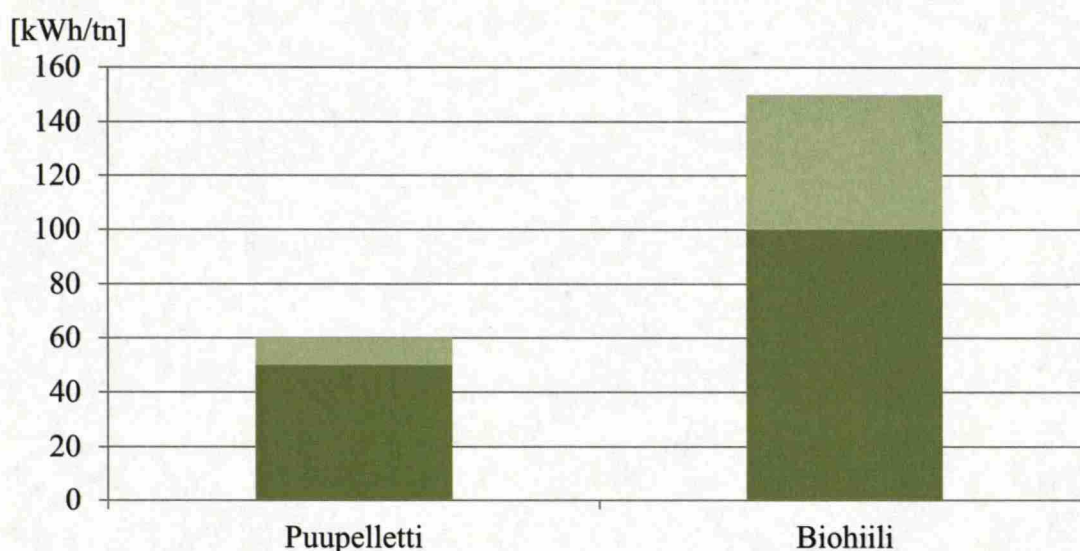
Ligniinin osuuden kasvun myötä pelletöinti ei helpotu eivätkä sen mekaaniset ominaisuudet parane. Päinvastainen trendi johtuu ligniinin lasinmuutoslämpötilaa korkeammasta torrefiointilämpötilasta, jonka vuoksi ligniini on osittain hajonnut ja sen rakennemuutokset ovat palautumattomia. Torrefioidun puubiomassan ligniini on muuttunut hauraaksi ja sen lasinmuutoslämpötila on kasvanut, joka johtuu torrefioinnin aikana poistuneesta kosteudesta. Lasinmuutoslämpötilan lisäksi pelletöintiä vaikeuttaa yleisesti pääsidoksina toimivat vetysidokset hemiselluloosan ja ligniinin välillä, koska torrefioinnin aikana hemiselluloosa on lähes hajonnut ja sidoksia ei pääse muodostumaan. /12, 18, 33/

Ligniinin pysyvien rakennemuutosten ja biohiilen matalan kosteuspitoisuuden vuoksi torrefioidun puubiomassan ligniinin lasisiirtymälämpötila on korkeampi, jolloin biohiilen ligniinin pehmeneminen ja käyttäytyminen sidosaineena vaativat huomattavasti puupellettejä korkeammat lämpötilat ja paineet toimiakseen torrefioinnin jälkeen. /12, 18, 33/

Pelletöitävyyden avainparametreja ovat pelletöintiprosessin lämpötila, paine ja biohiilen kosteuspitoisuus. Kosteuden lisäyksellä voidaan alentaa torrefioidun ligniinin korkeaa lasisiirtymälämpötilaa, lisäksi lisäaineiden käyttö parantaa sidosten muodostumista ja

korkeammat matriisilämpötilat mahdollistavat ligniinin pehmenemisen ja biohiilen pelletöinnin. /13, 18, 33, 40, 42/.

Paahtoasteen tummuus korreloi tarvittavan pelletöintilämpötilan kanssa, joka tukee myös oletusta, että ligniinin rakenne hajoaa enemmän ja lasisiirtymälämpötilan arvo kasvaa torrefioinnin tummuuden myötä. /42/. Tutkimuksien /13, 42/ mukaan biohiilen pelletöintiin kuluu puupelletteihin verrattuna jopa 100 – 150 % enemmän energiaa, kuten kuvasta 13 nähdään.



Kuva 13. Torrefioinnin vaikutus pelletöintienergiaan. /13, 42/.

2.5.3 Kestävyys

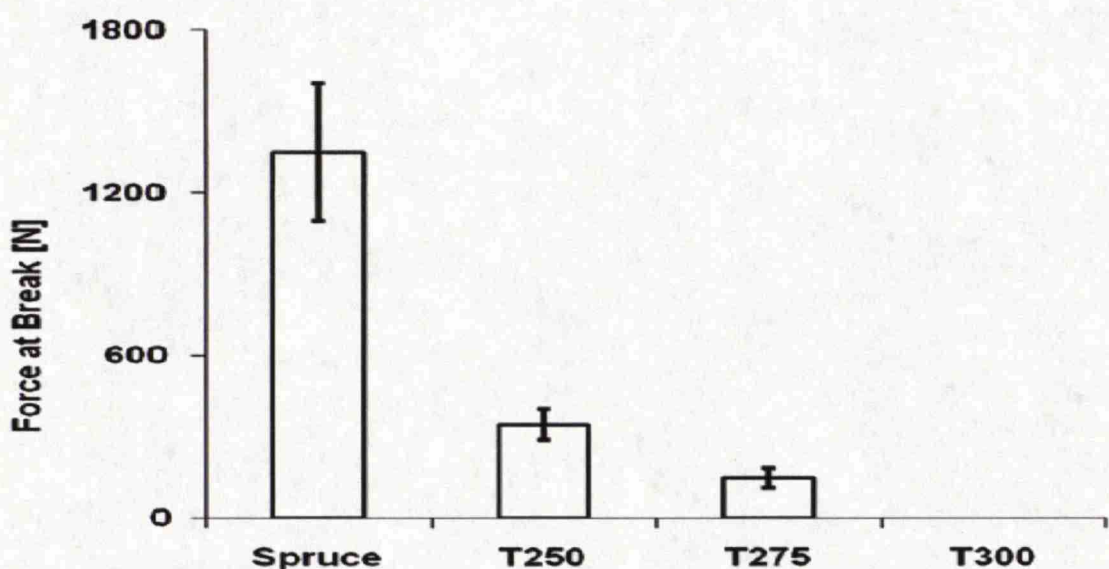
Kestävyys ja tiheys ovat pääparametrit, kun määritellään puristettujen kiinteiden biopolttoaineiden fyysisiä laatuominaisuuksia. Biopolttoaineet ovat kuljetuksen, varastoinnin ja käsittelyn aikana alttiina mekaaniselle hankaukselle ja iskuille, mikä aiheuttaa pölyn muodostumista ja hienoaineksen syntyä lastauksen, kuljettamisen, purun ja varastoinnin aikana. /12, 43/.

Hienoaines ja pöly voi häiritä kattiloiden syöttösysteemejä, joka voi johtaa epätasaisiin polttoprosesseihin. Lisäksi pöly voi myös edistää palo- ja räjähdysriskivaaraa käsittelyn, varastoinnin ja lastauksen aikana. Kustannus- ja energiatehokkuuden kannalta biohiilipelletin mekaanisilla ominaisuuksilla on kriittinen vaikutus koko logistiikkaketjun toimivuuteen. /41, 43/.

Mekaaninen kestävyys tarkoittaa puristetun biopolttoaineen kykyä pysyä koossa alkuperäisessä muodossaan käsittelyn aikana. Mekaaninen kestävyys on tärkeä laatuparametri, kun tarkastellaan pellettien kuljettamista ja käsiteltävyyttä. /43/. Pellettien mekaaniset kestävyysominaisuudet voidaan määritellä monella tavalla. Yleisimmin käytetyt ja standardisoidut testit huomioivat pelletin kovuuden (puristuslujuuden), kestävyuden (hankausvastus ja iskukestävyys) sekä kosteudenottokyvyn. Nämä ominaisuudet riippuvat puubiomassan raaka-aineesta ja valituista prosessiolosuhteista. Kaiken kaikkiaan nämä ominaisuudet ovat tärkeitä logistiikkaketjun aikana, koska pelletin tulee kestää erilaisia voimia käsittelyiden aikana ja pysyä ehjänä koko ketjun läpi. /12/.

Pellettilujuus korreloi pellettitiheyden kanssa. Eri muotojen ja palakokojen lujuutta voidaankin tutkia puristus- ja rummutuslujuustesteillä. Puristuslujuutta voidaan käyttää pellettien koossapysymiseen arviointiin esimerkiksi kuljetus- ja syöttöruuveissa. Rummutustestin tulosten avulla voidaan arvioida esimerkiksi, miten pelletit ja brikitit kestävät kuljetuksia ja kuormauksia. /41/.

Eri torrefiointilämpötiloissa (250, 275 ja 300 °C) valmistettujen biohiilipellettien puristuslujuutta verrattiin tavalliseen kuusesta valmistettuun puupellettiin. Kuvasta 14 nähdään puristuslujuus torrefiointilämpötilan funktiona ja huomataan, kuinka merkittävä lujuuden heikkeneminen on torrefioinnin edetessä. /13/.



Kuva 14. Torrefiointilämpötilan vaikutus pellettilujuuteen. /13/.

Pellettien mekaaniset lujuusominaisuudet huononevat siis torrefioinnin aikana, lisäksi ne heikkenevät paahtoasteen tummuuden myötä /12, 33/. Tutkimuksen /33, 44/ mukaan pellettilujuuden kannalta tärkein parametri on pellettimatriisin lämpötila, koska se korreloi positiivisesti niin puu- että biohiilipellettien lujuuksien kanssa.

Tutkimuksessa /42/ huomattiin biohiilipelletin kestävyys olevan luokkaa 80–90 %, kun puupelleteillä vastaavat arvot on yli 95 %. Samassa tutkimuksessa huomattiin pelletöinnin aikana syntyvän 10–32 % hienoaainesta. Puupellettejä heikommalla pellettikestävyys ja suuri hienoaainoksen määrä indikoivat, että biohiilen huonot sitoutumisominaisuudet johtuvat matalasta kosteuspitoisuudesta.

Prosessin kannattavuuden kannalta olennaista on, että polttoaine- ja jauhamisominaisuuksien parannukset kompensoivat myös massa- ja energiahäviöt (20 % ja 10 %) sekä pelletöintiominaisuuksia. Tutkimuksien /13, 45/ mukaan torrefiointilämpötilassa 240–250 °C voidaan saavuttaa koossapysyvä biohiilipelletti, jolla on suhteellisen korkea energiatiheys ja suotuisat mekaaniset ominaisuudet sekä jauhatukseen että pelletöintiin.

Tutkimuksen /44/ mukaan biohiilipelletin laatuparametrit ovat sen tiheys, kestävyys ja hydrofobisuus. Torrefioinnin aikana syntyneet massahäviöt korreloivat suoraan näiden parametrien kanssa. Tutkimuksessa huomattiin, että näiden ominaisuuksien kannalta paras biohiilipelletti syntyy torrefiointilämpötilassa 250 – 300 °C, kun massahäviöt ovat luokkaa 30 % ja matriisilämpötila välillä 170 – 240 °C. Näin saavutetaan biohiilipelletti, jonka kestävyys on puupellettien tasolla, tiheys on 5 – 10 % puupellettejä matalampi ja tasapainokosteuspitoisuus n. 50 % puupellettejä korkeampi.

2.6 Varastokäyttäytyminen

Varastoitaessa polttoaineita erkaantuu niistä kaasuja ja niiden pinnalla tapahtuu yleisesti kemiallisia reaktioita, minkä vuoksi varastointitilaan voi syntyä kaasuja, joilla on haitallisia terveys-, turvallisuus- ja ympäristövaikutuksia (HSE). /46/. Torrefioinnin aikana haihtuneiden volatiilien yhdisteiden ansiosta biohiili käyttäytyy paljon stabiilimmin kuin käsittelemätön biomassa, joka edesauttaa ja parantaa kuljetettavuutta ja varastoitavuutta. /37/.

Näin ollen biohiilen kuljetus- ja varastointilogistiikan suhteen erityistä huomiota on kiinnitettävä biohiilen mahdolliseen pölyämiseen pölyn räjähdysherkkyyden takia. Mikäli pölyämistä ei voida estää, on biohiilen varastointi pyrittävä järjestämään inertissä tilassa syttymisriskin ehkäisemiseksi. /46, 48/.

Mikäli biohiilellä on joitain vaaraominaisuuksia, ovat tällöin myös biohiiltä sisältävät pölyt vaarallisia tai haitallisia. Pölyn työhygieeniset riskit perustuvat vaaraominaisuuksien lisäksi mm. partikkelien laatuun ja hengitysilman hiukkasten määrään. Sama koskee myös ulkoilmaan kulkeutuvan pölyn terveysvaikutuksia, jolloin vaikutuksia ovat yleisen ilmanlaadun heikentyminen sekä mahdolliset pienten partikkelien aiheuttamat terveysvaikutukset. /46, 48/.

Mustana pölypäästönä biohiilipöly on esteettinen riski rakennetun ympäristön viihtyvyydelle ja aiheuttaa luonnon likaantumista. Tältä osin biohiilen ominaisuudet ovat todennäköisesti kivihiiltä vastaavat ja vaikutus riippuu pölyn laadusta, määrästä ja kulkeutumisesta. Biohiilipölyn hajoamisesta ja haitallisuudesta luonnossa verrattuna hiilipölyyn ei ole tietoa. Kuten hiilipöly, myös biohiilipöly voi kantaa mukanaan ympäristöön haitallisia aineita, kuten esimerkiksi aromaattisia hiilivetyjä, raskasmetalleja ja radioaktiivisia hiukkasia. Näiden määrät riippuvat biohiilen raaka-aineista ja prosessista. /46, 48/.

Biohiilen vesisumutuksella voidaan estää pölyämistä. Vesisumutuksen käytössä pölyn torjumiseksi on kuitenkin tärkeää huomioida, että kosteuden pääsy biopolttoaineiden varastoon kasvattaa itsesyttymisriskiä. Suuressa varastossa pohjalla kovimmassa paineessa oleva biopolttoaine alkaa lämmetä. Jos biomassassa on ylimääräistä kosteutta, vesi höyrystyy ja lämmin vesihöyry kondensoituu kuumentuneen alueen ulkopuoliseen polttoaineeseen lämmittäen sitä ja siten laajentaen kuumentuneen polttoaineen vyöhykettä. /46, 48/.

2.6.2 Hajoaminen

On tunnettua, että puubiomassa hajoaa kemiallisesti ja biologisesti asteittain ajan mittaan, hiljalleen vapauttaen (*eng. off-gassing*) myrkyllisiä ja tukahduttavia kaasuja, kuten hiilidioksidia (CO_2), häkää (CO) ja metaania (CH_4). /46, 49/.

Biohiilen hajoamisesta ei ole tarkkaa tietoa. Tiedetään kuitenkin, että torrefioinnista johtuvien kemiallisten reaktioiden johdosta biohiilestä poistuu kemiallisesti ja mikrobiologisesti aktiivisia aineita ja biohiileen muodostuu ei-polaarisia kyllästymättömiä rakenteita, jotka suojaavat biohiiltä biologiselta hajoamiselta, kivihiilen tapaan. /12/. Lisäksi biohiilellä tehty hajoamistutkimus /34/ viittaa siihen, että biohiilen biologinen hajoaminen varastoitaessa on selvästi normaaleja puupellettejä hitaampaa johtuen biohiilen alhaisesta tasapainokosteuspitoisuudesta ja osittaisesta hydrofobisuudesta.

Biohiilen hajoamisesta on eriäviä tutkimustuloksia. Tutkimuksessa /48/ on huomattu, että biohiilen varastoinnin tapahtuessa huoneenlämmössä, biohiilestä vapautuvat häkä- ja hiilidioksidimäärät ovat noin kolmas osa verrattuna puuhakkeeseen. Kun taas tutkimuksen /15/ mukaan, biohiilen biologinen hajoaminen päättyy täysin torrefioinnin jälkeen.

2.6.3 Itsesytyminen

Laki /50/ määrittelee, että aineet on luokiteltava 4.2 Helposti itsestään syttyvät aineet - luokkaan, jos niistä otettu koekuutio, jonka sivun pituus on 10 cm, syttyy itsestään tai kuumenee yli 200 °C lämpötilaan 140 °C:n koelämpötilassa 24 tunnin aikana. Tämä arviointi perustuu puuhiilen itsesyttymislämpötilaan, joka on 50 °C käytettäessä 27 m³:n koekuutiota. Aineet, joiden itsesyttymislämpötila on korkeampi kuin 50 °C käytettäessä 27 m³:n koekuutiota, eivät ole luokan 4.2 aineita.

Polttoaineiden varastoinnissa on huomioitava aina itsesyttymisvaara. Aineen itsestään lämpeneminen on prosessi, jossa aineen asteittainen reaktio hapen kanssa kehittää lämpöä. Jos lämmön kehittymisen nopeus ylittää lämpöhäviön, aineen lämpötila nousee, mikä induktioajan jälkeen voi johtaa itsesyttymiseen ja palamiseen. Polttoaineet hapettuvat hiljalleen, ja ”oikea” lämmön ja kosteuden yhdistelmä voi aiheuttaa pyroteknisen prosessin, jolloin pelletit syttyvät itsestään. Niiden palamisessa voi syntyä myrkyllisiä kaasuja, mikä voi aiheuttaa myös räjähdysvaaran. Kyllästymättömien rasvahappojen hapettumisen on arveltu olevan suurin yksittäinen lämpölähde. /46, 51/.

3. LOGISTIKKAKETJU

Liikennepolttoaineiden hintojen nousu ohjaa yrityksiä hakemaan entistä päästö- ja energiataloudellisempia ratkaisuja kuljetuslogistiikkaan. Lisäksi EU:n kuljetussäännökset kannustavat siirtämään kuljetuksia maanteiltä muille väylille. /14/. Pitkän tähtäimen bioenergiamarkkinoita suunniteltaessa on syytä huomioida juuri taloudellisuus ja energiatehokkuus. Yksityiskohtaisia analyysyjä tulee tehdä eri kuljetusmuodoista ja niiden kustannuksista, eri komponenttien, kuten lastauksen, purun ja varastoinnin energiankulutuksista sekä itse logistiikkaketjun organisoinnista. Logistiikkaketjun parametrit, kuten kuljetusetäisyys, biomassan mekaaniset ominaisuudet, mahdolliset materiaalihäviöt ja itse logistiikkaketjun laajuus, vaikuttavat merkittävästi taloudellisuuteen ja toteuttamiskelpoisuuteen. /52, 53/.

Energiataloudellisesti kannattavampaa on kuljettaa energiatihedeltään tiiviimpää biohiiltä kuin käsittelemätöntä biomassaa. Kuljetettaessa biomassaa sellaisenaan käsittelemättömänä, jää hyötykuorma melko pieneksi, joten pitkiä matkoja varten energiatihyettä tulisi kasvattaa torrefioimalla ja pelletöimällä. /54/.

Biohiilen valmistusmenetelmän edut ovat parhaimmillaan laajamittaisessa ja pitkiä kuljetusmatkoja vaativassa bioenergialiiketoiminnassa, kun biohiiltä siirretään satojatuhansia tonneja. Biohiilen ominaisuudet ovat logistiikkaketjulle suotuisimmat kuin käsittelemättömän biomassan, jolloin järkevä ja energiataloudellisesti kannattava kuljetus mahdollistuu. /14, 30/.

Biohiilen kaupallisen käytön edellytys on, että biohiili on stabiilisti varastoitavissa ja kuljetettavissa. Käytännössä biohiili ei saa kuljetuksen ja varastoinnin aikana oleellisesti jauhautua eikä siitä saa erkaantua merkittäviä määriä kaasuja. Biohiilen varastoinnin ja käsittelyn toimivuus asettavat merkittävästi vaatimuksia biohiilen ominaisuuksille ja näyttää siltä, että varastointikestävyys ja mekaaniset ominaisuudet ovat ohjaavia tekijöitä biohiilen tuotannon kehittämisessä. Polttoaineen käsittelyyn ja kuljettamiseen liittyy palo- ja räjähdysvaaroja, jotka on otettava huomioon. Toiminnot ja käytettävät laitteet ja rakenteet on suunniteltava niin, että riskit hallitaan. /8/.

3.1 Energiataloudellisuus logistiikassa

Energiataloudellisuus kuvaa energiatehokkuuden kautta saavutettua kustannustehokkuutta. Logistiikassa energiataloudellisuuden mittaamiseen ei ole vielä vakiintunutta käytäntöä ja tarkastelut on tyypillisimmin rajattu tuotteiden kuljetusketjuihin. Logistiikan energiataloudellisuutta voidaan mitata esimerkiksi kumulatiivisella energiankulutuksella, kuljetusintensiteetin ja kuljetusjalanjäljen avulla sekä sähkön että primäärienergiankulutuksen avulla. /55/.

Koko toimitusketjun kattava taserajaus sisältää raaka-aineiden hankinnan ja tuotannon; raaka-aineiden ja välituotteiden tulologistiikan, tuotannon, lähtölogistiikan sekä tuotteiden toimituksen asiakkaalle. Logistiikan energiataloutta on mitattu tyypillisimmin kuljetussuoritepohjaisilla mittareilla, kuten kuljetusten energiankulutuksella. Toimitusketjun tasolla on usein tarpeellista laskea yhteen toimitusketjun eri osien energiankulutusarvoja, jolloin on mahdollista tarkastella koko logistisen ketjun energiataloutta. Energiataloudellisen tarkastelun avulla on mahdollista tunnistaa eniten energiaa kuluttavia toimitusketjun osia ja energiatehokkuustoimenpiteitä. Kuljetusketjujen valinnoilla ja energiatehokkuusparannuksilla voidaan osaltaan vaikuttaa koko toimitusketjun energiataloudellisuuteen. /55/.

3.2 Kuljettaminen

Kuljetusmuodon valintaan vaikuttavat yritykseen, lähetykseen ja kuljetusmuotoon liittyvät ominaisuudet. Valintaperusteita ovat mm. toimiala, kuljetustarpeen säännöllisyys, toimitustiheys ja lähettäjän maantieteellinen sijainti. Lähetykseen liittyviä ominaisuuksia ovat kuljetusetäisyys, -tiheys, erä koko ja -arvo. Kuljetusmuotojen välillä on yleensä eroja kapasiteetin saatavuudessa, hinnassa, luotettavuudessa ja nopeudessa. /56/.

Kuljetusten täsmällisyys on yleensä sitä tärkeämpää mitä kalliimpia tuotteita kuljetetaan. Massatavaran kuljetuksissa hinta on täsmällisyyttä merkittävämpi tekijä. JOT -tyyppisessä (Just On Time) toiminnassa kuljetusvarmuus on koko tuotannon perusedellytys: tuotteen on oltava oikeaan aikaan, oikean kokoisena eränä ja vaurioitumattomana tuotantolaitoksessa. /56/.

Kuljetusjärjestelmää ja -muotoa valittaessa pyritään yhdistämään vaatimukset hyvästä palvelutasosta, laadusta ja kohtuullisista kustannuksista. Kuljetusmuoto määräytyy sen mukaan tapahtuuko kuljetus maan-, rauta- vai vesiteitse. Jokaisella kuljetusmuodolla on etuja ja heikkouksia, joten kuljetusmuodon valinta on tehtävä tapauskohtaisesti. /56/.

Biohiiltä on mahdollista kuljettaa perinteisen maantiekuljetuksen lisäksi rauta- ja vesiteitse tai niiden yhdistelmillä. Kuljetusmuodon valintaan vaikuttavat energiataloudellisuuden lisäksi myös jo olemassa oleva infrastruktuuri lastaus- ja purkupaikoilla, eräkoot sekä biohiilen mekaaniset lujuusominaisuudet. Pelletöidyn biohiilen energiatiheys on hyvä moniin jalostamattomiin biomassoihin verrattuna, sen vuoksi biohiiltä voidaan kuljettaa kannattavasti kauempaakin. /8/.

Kuljetusten kustannukset koostuvat itse rahtikustannuksista sekä purku- ja lastauskustannuksista. Riskien hallinnan kannalta on toisinaan tärkeää hajauttaa kuljetukset erilaisiin kuljetusketjuihin toimitusvarmuuden maksimoimiseksi. Kuljetusten hajauttaminen erilaisiin ketjuihin parantaa toimitusvarmuutta lakkojen, vaikeiden keli- tai jääolosuhteiden vallitessa yms. tilanteissa. Kuljetuksien suunnittelussa kustannusten kannalta on huomioitava, että eri kuljetusten välillä tapahtuvat purku- ja lastaustyöt tuovat merkittävän lisäkustannuksen kuljetusketjun kokonaiskustannuksiin. /57/.

Kaiken kaikkiaan kuljetusmuodon valinta riippuu kuljetuksen alku- ja loppupään sijainnista, kuljetettavan materiaalin ominaisuuksista ja eräkoosta. Spesifisissä hankalasti sijoitetuissa paikoissa autokuljetus on joustavin ja helpoin tapa kuljettaa pieniä määriä. Keskikokoisissa bulkkikuljetuksissa, joissa raiteet ovat suhteellisen lähellä sekä lastaus- että purkupäätä, on rautatiekuljetus usein järkevin vaihtoehto. Suurempien mittaluokkien bulkkikuljetuksissa, jossa satama on suhteellisen lähellä ja vientikohde ulkomailla, tai muuten pitkän matkan päässä, on kuljetus vesiteitse optimaalisin vaihtoehto. /57/.

3.2.1 Maantiekuljetukset

Tiekuljetukset ovat käytetyin kuljetusmuoto niin Suomessa kuin monissa muissakin maissa. Tiekuljetuksia käytetään monissa kuljetuksissa sen joustavuuden, nopeuden, edullisuuden ja soveltuvuuden vuoksi. Tiekuljetuksilla voidaan kattaa kuljetukset

lyhyistä etäisyyksistä pitkiin etäisyyksiin sekä muun muassa elintarvikkeiden, pitkälle jalostettujen tuotteiden sekä pienten tavaraerien kuljetukset. /56, 57/.

Maantiekuljetuksia käytetään pääasiassa lyhyen matkan kuljetuksissa, kun on kyse raskaista ja säännöllisistä kuljetuksista. Keskipitkillä ja pitkillä matkoilla valitaan tiekuljetus, kun se on edullisin tai ainoa vaihtoehto. Kaikista tiekuljetuksista yli 50 prosenttia on alle 50 kilometrin mittaisia. Maantiekuljetuksen käyttö perustuukin juuri kattavaa liikenneverkkoon sekä joustaviin kuljetusmahdollisuuksiin. Tiekuljetukset aiheuttavat paljon päästöjä, mutta usein tiekuljetukset ovat ainoa vaihtoehto, kun kuljetetaan tavaraa esimerkiksi Suomen sisäisessä liikenteessä. /56, 57/.

3.2.2 Rautatiekuljetukset

Rautatiekuljetus on kustannus- ja energiatehokas, ympäristöystävällinen ja turvallinen tapa kuljettaa henkilö- ja tavaravirtoja. Rautatiekuljetuksia käytetään pääasiassa pitkien matkojen ja suurten materiaalmäärien, lähinnä perusteollisuuden raaka-aineiden ja tuotteiden säännöllisissä kuljetuksissa. Rautatiekuljetuksia voidaan käyttää myös lyhyillä matkoilla, mutta keskimääräinen pituus rautatiekuljetuksille on kuitenkin noin 230 kilometriä. /56, 57/.

Tieverkkoon verrattuna rautateiden kuljetusverkko on hyvin harva, mutta kattaa yleensä tärkeimmät kuljetuskohteet. Rautateiden käyttöä kuljetusketjun osana puoltavat ympäristötekijät. Rautateitse pystytään kuljettamaan huomattavasti suurempia tavaramääriä energiatehokkaammin ja ympäristöystävällisemmin kuin maantieliikenteessä. /56, 57/.

Yhdistetyissä rekka-junakuljetuksissa tärkeää kannattavuuden kannalta olisi tehokas materiaalin siirto kuljetusvälineestä toiseen. Aikaa vievät purkamis- ja lastausvaiheet tulisi jättää kuljetuksen alku- ja loppupäähän. Yleisesti bioenergiamassan rautatiekuljetuksia on rajoittanut sopivien terminaalialueiden puute, rajattu loppuasiakkaiden määrä, kilpailun puute rautatiemarkkinoilla sekä vaunukaluston saatavuus. /54/.

Tällä hetkellä VR:llä ei ole suoraan biohiilelle tarkoitettuja vaunutyyppkejä, mutta käytännössä jos kuljetussopimus tehdään pitkäksi aikaa ja potentiaalia on riittävästi, vaunutyyppkejä voidaan rakentaa ja modifioida asiakkaan sekä tuotteen kuljetustarpeen

mukaan. Tällä hetkellä olevan kaluston puitteissa biohiilen kuljettamiseen sopisivat kontti- ja irtotavaravaunutyylliset ratkaisut. VR:n Fat, Fakks- ja Tabd -irtotavaravaunut, joilla normaalisti kuljetetaan haketta ja talkkia, sopisivat myös hyvin biohiilen kuljetukseen. Fat- ja Fakks -irtotavaravaunujen kuormaaminen voi tapahtua kauhakuormaajalla, hihnakuljettimella tai kuormaussillalta kippaamalla. Vaunu puretaan nostamalla sivuseinä ylös erityisellä nostolaitteella ja kaapimalla hake purkauskuoppaan. Fakks -vaunuissa lattian ja sivuseinien rakennetta on vahvistettu. Tilavuudeltaan nämä vaunut ovat 151,5 m³. /58/.

Hopper -tyylinen Tabd -irtotavaravaunun säiliön pohja muodostuu purkausluiskan harjaan nojaavasta V-pohjasta. Säiliö on väliseinällä jaettu kahteen osaan. Säiliön katossa on sivulle kääntyvä, säiliön pituinen kuormausluukku ja kummallakin sivulla kaksi yläosastaan saranoitua purkausluukkuja. Sekä ylä- että alaluukkujen käyttövoimana on paineilma, jonka lähteenä voidaan käyttää joko ulkopuolista paineilmaverkkoa tai veturin paineilmasäiliötä. Tabd -vaunun tilavuus on vain 75,0 m³. /58/.

Yhdistelmäkuljetuksiin sopisi konttityylinen ratkaisu. Yhdistetyissä kuljetuksissa on oleellista nopea ja sujuva siirto kuljetusvälineestä toiseen. VRTranspoint vuokraa mm. Innofreightin konttikalustoa tarpeen mukaan. Sekä täysperävaunuyhdistelmään että yhteen junan vaunuun mahtuisi kontteja kolme kappaletta. Sg-t -konttivaunun maksimi kuorma 61 t. /58, 59/.

Raideliikennettä hyödyntäen olisi mahdollista toteuttaa pitkälle automatisoitu ja toiminnan aikana ympäristöarvojen näkökulmasta hyvältä näyttävä logistinen ratkaisu, koska rautatieliikennettä pidetään yleisesti ympäristöystävällisimpänä kuljetusmuotona. Raideliikenteen suurin etu ympäristönäkökulmasta katsottuna on suhteellisen pieni energiankulutus ja energiatehokkuus, jonka ansiosta sen päästöt jäävät muiden liikennemuotojen päästöjä huomattavasti pienemmiksi. /53, 56, 57/.

3.2.3 Alus- ja proomukuljetukset

Maailmanlaajuisesti merkittävimmät polttoaineet kuljetetaan meriteitse. Fossiilisten polttoaineiden, kuten kivihiilen lisäksi meriteitse kuljetetaan biopolttoaineita energiakäyttöön, joskin niiden kuljetusmäärät ovat huomattavasti pienempiä.

Merkittävimmät meriteitse kuljetettavat bioenergiatuotteet ovat liikenteen biopolttoaineina käytettävät bioetanoli ja biodiesel, sekä pelletit, joita käytetään sähkön- ja lämmöntuotannossa. /60/.

Meritiekuljetuksessa vaihtoehtoina ovat joko proomu- tai irtolastialuskuljetus tai niiden yhdistelmä. Proomuja käytetään maailmalla yleisesti sisävesikuljetuksissa. Proomuja on jonkin verran myös käytössä merellä, pääsääntöisesti kuitenkin merten rannikkoalueilla. Yleensä proomukuljetusten etuja varsinaisiin irtolastialuksiin verrattuna on edullinen hinta ja tämän lisäksi proomuja voidaan käyttää myös väliaikaisina varastoina ilman, että varsinainen kuljetuskalusto seisoo. /61, 62/.

3.2.4 Kuljetusmuotojen energiankulutukset

VTT:n Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen LIPASTO - laskentajärjestelmästä saatujen eri kuljetusmuotojen energiankulutukset voidaan nähdä taulukosta 6. /63/.

Taulukko 6. Eri kuljetusmuotojen energiankulutukset. /63/.

Kuljetusmuoto	MJ/tkm
Irtolastialus, bulk, keskisuuri	0.20
Irtolastialus, bulk, suuri	0.14
Puskuproomu, iso	0.22
Puskuproomu, pieni	0.30
Irtolastialus, pieni	0.34
Sähköjuna ilman vaihtotyölisää ¹⁾	0.21
Sähköjuna vaihtotyölisineen ¹⁾	0.24 ¹
Dieseljuna ilman vaihtotyölisää ²⁾	0.33
Dieseljuna vaihtotyölisineen ²⁾	0.36
Täysperävaunuyhdistelmä (täysi 40 t:n kuorma)	0,46

¹⁾ Primäärienergiankulutus. Primäärienergia on laskettu Suomen keskimääräistä sähköntuotannon hyötysuhdetta (50,8 %) käyttäen, josta saadaan sähkön primäärienergiakertoimeksi 1,97.

²⁾ Dieseljunaliikenteelle on käytetty suoraan dieselin lämpöarvoa 43 MJ/kg polttoainetta.

3.2.5 Kuljetuskustannukset

Energiataloudellisuuteen liittyy energian lisäksi taloudellisuus. Olennainen osa logistiikkaketjun energiatiloudellista tarkastelua on kuljetuskustannuksien vertailu eri

kuljetusmuotojen välillä. Eri kuljetusmuotojen kuljetuskustannuksiin vaikuttavat kuljetusmatkan pituuden lisäksi myös kuljetusrytmin säännöllisyys, täyttöaste, vaihtotöiden määrä, kuljetusvolyymit ja olemassa oleva infrastruktuuri.

Taulukosta 7 nähdään metsätilastollisesta vuosikirjasta saadut markkinapuun kaukokuljetuksen yksikkökustannukset. Autokuljetuksessa kustannukset vaihtelevat matkan pituuden mukaan. Lyhyillä matkoilla (keskikuljetusmatka n. 50 km) ovat autokuljetuksen kuljetuskustannukset pitkiä matkoja (keskikuljetusmatka yli 100 km) keskimäärin 35 % korkeammat. Juna- ja aluskuljetuksien kustannuksissa oletetaan, että infrastruktuuri on jo olemassa ja volyymimäärä on suuri.

Taulukko 7. Markkinapuun kaukokuljetuksen yksikkökustannukset vuodelta 2011. /64/.

Kuljetuskustannukset*	cnt/m ³ km
Autokuljetus (lyhyt matka)	10,5 - 10,7
Autokuljetus (pitkä matka)	6,7 - 7,2
Junakuljetus	2,3
Aluskuljetus	3,5

*olettaen, että suuri volyymimäärä ja infrastruktuuri olemassa

Rautatiekuljetusten kustannukset ovat noin kolmasosan autokuljetuksesta, jos infrastruktuuri on olemassa ja kuljetusmäärät ovat suuria. Lisäksi junakuljetuksissa kustannuksiin vaikuttavat hyvin paljon volyymi- ja vaihtotyömäärät sekä kuljetusten säännöllisyys. Rautatiekuljetusten kustannukset nousevat jyrkästi jos kuljetusvolyymit alenevat, junakoko pienenee tai kuljetukset muuttuvat epäsäännöllisiksi. Epäsäännöllisissä kuljetuksissa ongelmaksi muodostuu kaluston sitoutuma, eli vaunuille ei saada hiljaisempina aikoina tai muina päivinä hyötykäyttöä, ja volyymien heilahdellessa ongelma on kiinteä vetokustannus alhaisella käytöllä. Täten rautatiekuljetukset vaativat suuret volyymit ja toimivan rataverkon lähtö- ja määränpään välille, jotta kustannukset pysyvät kilpailukykyisinä. /58/.

Meriteitse voidaan kuljettaa suuriakin eriä pienemmillä kilometrikustannuksilla verrattuna rautatie- ja maantiekuljetusten kustannuksiin. /54/. Meriteitse rahtihintoihin vaikuttavat paljon suhdannenäkymät, jota Baltic Dry – indeksi (BDI) kuvaa. Baltic Dry -indeksi mittaa tärkeimpien raaka-aineiden merirahtiliikenteen kuivarahtihintoja 23 merirahtireiteillä. Rahdin hintaan vaikuttavat kuljetettavan tavaran määrä sekä tarjolla

olevien alusten määrä. Rahtihintoja onkin pidetty talouden kysyntää hyvin kuvaavana indikaattorina, ja historiallinen tarkastelu näyttäisi osoittavan että kyseisen indeksin muutokset ovat pystyneet ennakoimaan pörssikurssien käännteitä. /65/.

3.3 Varastointi

Polttoaineen varastointitapaan vaikuttaa useita tekijöitä. Näitä ovat mm. kuljetustapa tai -tapojen yhdistelmä, polttoaineen kulutuksen ja tuotannon jakautuminen vuoden jaksolle, päätepuoleen varastokapasiteetti, polttoaineen varastointiominaisuudet ja niistä mahdollisesti johtuvat käytännön tai viranomaismääräysten rajoitukset. Valmiin tuotteen kosteudenkestävyys, mekaaniset ominaisuudet sekä palo- ja räjähdysvaara vaikuttavat luonnollisesti merkittävästi varastoinnin ja kuljetuksen toteutustapaan. /8/.

Biopolttoaineiden varastointitapoja on monenlaisia, niistä yleisin on avoin polttoainekenttä, jossa polttoainetta varastoidaan kasalla, lisäksi voidaan käyttää siiloja ja muita käytettyjä ovat maanalaiset varastot sekä hallivarastot. Siilojen etu on niiden pieni pohjapinta-alan tarve ja tehokkuus. Maanalaisten varastojen rakentaminen on kallista ja niissä esiintyy helposti kosteusongelmia. /8/.

Polttoaineen fysikaalis-kemialliset ja mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti varaston suunnitteluun ja tuotteen varastoitavuuteen. Virtaus-, asettumis-, vierimis-, kitkakulmat sekä mahdollinen holvaantumisriski tulee ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa. /26/.

Polttoainevarastoissa oleellisia näkökohtia ovat varastointivolyymien lisäksi sammutettavuus, veden riittävyys ja varastopaloon varautuminen etukäteen, esimerkiksi säiliön tyhjentämismahdollisuudet. Polttoaineen varastointiin liittyviä kysymyksiä ovat mahdollinen spontaani lämpötilan nousu, itsesytyminen ja sen torjuntamekanismit sekä varastoinnin, lastaamisen, purkamisen ja kuljettamisen muodostama pölyräjähdysriski. /46/.

3.4 Lastaus-, purku- ja kuljetinratkaisut

Biohiilen heikon mekaanisen lujuuden vuoksi se rikkoutuu ja hajoaa herkästi lastauksen ja purun aikana. Massahäviöitä syntyy ja pölyn muodostus aiheuttaa palo- ja turvallisuusriskin. Tämän vuoksi biohiilelle tarkoitettujen lastaus-, purku- ja

kuljetinratkaisujen tulee olla hellävaraisia. Kuljetin- ja varastointivaihtoehtojen suunnittelussa pölyn minimointi ja hallinta tulevat olla lähtökohtana. /8/.

Biohiilen purku- ja kuljetinratkaisuja suunniteltaessa tulee pölyn hallinnan lisäksi huomioida biohiilen suojaaminen sääolosuhteilta. Pölyn muodostuksen aiheuttaman palo- ja räjähdysriskin vuoksi kaikki kuljettimet tulee varustaa tarkoitukseen sopivilla palontunnistus- ja sammutuslaitteilla. Kaikkia lastaus-, purku- ja kuljetinjärjestelyjä, joiden aikana voi mahdollisesti tapahtua iskuja, hiertymistä, kiilausta tai jauhautumista, tulee välttää. Näihin kuuluvat mm. mekaaniset purkaimet, kuten kahmarit ja kuljettimista ketju- ja ruuvikuljettimet sekä -syöttimet, jotka ovat varsin kovia biohiilelle. /8, 66/.

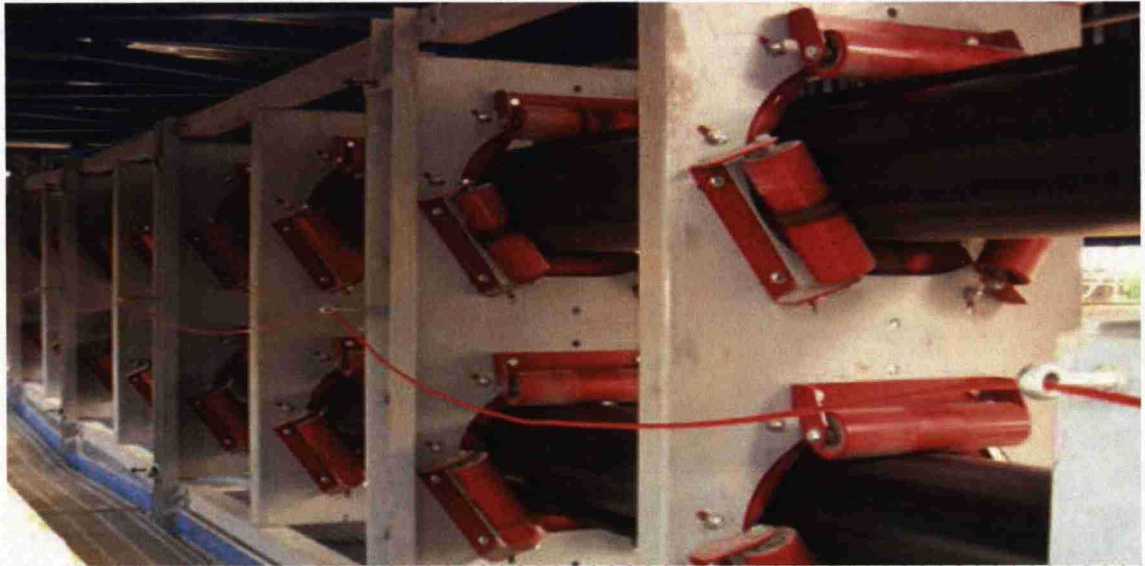
Biohiililastin purkuun sopisi pneumaattinen, imuun perustuva suljettu purkain, joka on samalla suhteellisen hellävarainen ja hallitsee pölyn. Pneumaattiset ratkaisut ovat perinteisiä mekaanisia ratkaisuja edullisempia toteuttaa, mutta kuluttavat käytännössä paljon energiaa. Pneumaattiset purkaimet ovat tehokkaita pienten laivojen ja proomujen purkamisessa sen erinomaisen tyhjennysprosentin vuoksi. /67/.

Biohiilen kuljettamiseen hyvänä ratkaisuna toimii hihnakuuljetin. Hihnakuuljetin on kestävä kumihihnaa, joka on suhteellisen hellävarainen ja täten sopiva myös biohiilen kuljettimiksi (Kuva 15). Kuljettimien vaihtokohdat on kuitenkin huomioitava, jotta iskuja voidaan minimoida kuljettamisen aikana. /67, 68/.



Kuva 15. Sekä kivihiilelle että biohiilelle soveltuva hihnakuuljetin. /68/.

Varteenotettava vaihtoehto hihnakuljettimen rinnalle olisi putkihihnakuljetin, joka voidaan mukauttaa sekä vertikaalisiin että horisontaalisiin kaarteisiin ja siten minimoida siirtokohtien ja pölyn määrää (Kuva16). Putkihihnakuljetin on hihnakuljettimen tapainen ratkaisu, joka käännetään hihnan lastauskohdan jälkeen rullalle kuljetettavan materiaalin ympärille ohjainrullien avulla. Se on varsin tiivis hyvin toimiessaan ja toimii hyvin pölyn hallinnassa. /66, 69/.



Kuva 16. Putkihihnakuljetin. /69/.

Kuljetinratkaisuja mietittäessä tulee huomioon ottaa myös biohiilen virtausominaisuudet ja mahdollisesti sen “takaisin liukuminen” kuljettimen nostokulman ylittäessä tietyn raja-kulman. Liukumiskulmaan vaikuttavat ainakin kuljettimen pinnan materiaali ja hienoaineksen määrä. /70/.

Varastosiilon tyyppi, tasapohjainen vai suppilomainen, vaikuttaa sen purkutapaan. Biohiili toimii hyvien virtausominaisuuksiensa takia hyvin myös suppilomaisessa ratkaisussa. Siilojen pohjaluukut voidaan avata ja antaa biohiilen virrata esimerkiksi hihnakuljettimelle. Tasapohjaisten siilojen purkuun käytetään ruuvipurkaimia. Mekaaniset purkaimet saattavat kuitenkin olla liian kovia biohiilelle ja aiheuttaa massahäviöitä. /66/.

3.5 Turvallisuusluokittelut

Polttoaineen logistiikkaketjua suunniteltaessa tulee ottaa huomioon varastoinnin ja kuljetuksen turvallisuusvaatimukset. Biohiilen käytölle ja kuljettamiselle tärkeät turvallisuuteen liittyvät tunnusluvut ovat vielä määrittelemättä. Tällä hetkellä biohiilellä ei ole kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n turvallisuusluokitusta eikä sitä voida kuljettaa meriteitse ilman erikoislupaa. Lisäksi biohiilen REACH -asetuksen mukainen käyttöturvallisuustiedote (MSDS), jolla välitetään tietoa aineen tai seoksen ominaisuuksista, riskeistä sekä turvallisesta käytöstä teollisuus- tai ammattikäytössä, puuttuu. Kemikaalien yhdenmukaistettu luokitus- ja merkintäjärjestelmä GHS on vielä määrittelemättä biohiilen osalta. /71, 72/.

Ennen tunnuslukujen määrittelemistä, tulee biohiili kuitenkin standardoida tuotteeksi. Biohiilen tulevien standardien luomisen kannalta EU:n 7. puiteohjelman SECTOR (Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of TORrefaction) -hanke on tällä hetkellä keskeisimmässä roolissa. SECTOR -hanke tähtää torrefiointiteknologian kaupallistamiseen ja torrefioidun biomassan laajamittaisen markkinoille tulon tukemiseen. Teknologian kehittämisen lisäksi hankkeessa pyritään edesauttamaan markkinoiden syntymistä luomalla yhteisiä menetelmiä biohiilen laadun testaamiseen ja luokitteluun. SECTOR -hankkeen työryhmissä käsitellään myös biohiilen materiaalisominaisuuksia. Tältä pohjalta on tarkoitus antaa tukea kansainvälisen ISO 17225 -standardin kehittämiseen. Hanke on käynnistynyt tammikuussa 2012 ja se jatkuu vuoden 2015 kesään saakka. /46, 71, 73/.

Jos biohiili luokitellaan ADR:n sopimuksen mukaisesti 4.2 Helposti itsestään syttyvät aineet – luokkaan, tulee biohiilen kuljettamisessa ottaa huomioon vaarallisten aineiden kuljetuksiin (VAK) tarkoitetut turvallisuusohjeet. /50/.

Tilat, joissa on tai voi muodostua räjähdysvaarallista kaasun tai pölyn seosta, on toteutettava räjähdysvaarallisia tiloja koskevien ATEX -määräysten mukaisesti. Vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuutta koskevan lain (390/2005) 135 §:n mukaan on turvatekniikan keskus julkaissut räjähdysvaarallisia tiloja ja laitteita koskevat standardit, joita tulee noudattaa. /74/.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksen kokeellisen osan tavoitteena on selvittää torrefioidun puubiomassan tiivistämiseen, varastointiin, kuljetukseen ja käyttöpaikalla tapahtuvaan käsittelyyn tarvittavan energian määrä ja vertailla eri tavoin toteutettujen käsittely- ja kuljetusketjujen energiankulutuksia. Lisäksi tarkastellaan biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun kuljetuskustannuksia ja tiheyden muutosten vaikutuksia. Esimerkkikohteeksi on valittu toimintoketju, jossa biohiili valmistettaisiin PVO Lämpövoima Oy:n Kristiinan voimalaitoksen yhteydessä ja se käytettäisiin Helsingin Energian Salmisaaren voimalaitoksella.

Tutkimuksessa aineistonkeruuna käytettiin TISCO-hankkeen puitteissa tehtyjä selvityksiä biohiilen ominaisuuksista ja haastateltiin hankkeessa tiiviisti mukana olleita yritysten asiantuntijoita. Tarkoituksena oli selvittää biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun mahdollisuuksia ja Salmisaaren voimalaitoksen sisäisen logistiikan nykytilaa. Lisäksi tavoitteena oli luoda selvä kuva kotimaan rahtikuljetuksista ja niiden kustannuksista ja kustannuksiin vaikuttavista seikoista.

Novox Oy on yhteistyössä Helsingin Energian kanssa tarkastellut useamman vuoden ajan biohiilen valmistus- ja käyttömahdollisuuksia kivihiilen korvaajana ja alkuvaiheen perusselvitykset ovat valmistuneet kaksi vuotta sitten. Biohiiltä on toistaiseksi valmistettu vain koe-eriä. Lähtötietona käytetään näillä koe-erillä tehtyjen tutkimusten tuloksia sekä kirjallisuudesta saatuja tuloksia biohiilen ominaisuuksista. Keskeisenä asiana on kuljetuksen ja varastoinnin biohiilelle asettamien vaatimusten määrittely ja näiden vaatimusten välittäminen biohiilen valmistusta kehittävien osaprojektien käyttöön.

4.1 Erkaantuvien kaasujen analysointi

Biohiili on hyvin huokoista ja sen pinta-ala massayksikköä kohden on hyvin suuri. Biohiili on aktiivihiilen tavoin adsorbenttimateriaali, jolla on rakenteensa ja ominaisuuksiensa vuoksi kyky adsorboida monia orgaanisia ja epäorgaanisia aineita. Näin ollen biohiili imee itseensä torrefioinnin aikana osan syntyneistä paahtokaasuista, jotka varastoinnin aikana sitten erkaantuvat. Vapautuvat paahtokaasuyhdisteet saattavat sisältää karsinogeenisia PAH -yhdisteitä sekä haitallisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä

(VOC), jotka saattavat suurina pitoisuuksina olla hengenvaarallisia ja vaativat varastoinnin aikana erityishuomiota.

Helsingin Yliopiston Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitoksella suoritettiin koe, jossa analysoitiin biohiilestä erkaantuvia kaasuja. Analysointi tapahtui kiinteäfaasimikrouuttotekniikalla (SPME), joka oli liitetty perinteiseen kaasukromatografia-massaspektrometriin. SPME -näytteenkeruulaiteella saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että biohiilestä vapautuu vielä valmistuksen jälkeenkin torrefioinnin aikana syntyneitä paahtokaasuja.

Tulosten mukaan biohiilinäytteistä erkaantui odotetusti mm. etikka- ja heptaanihappoa, toluenia, heksanaalia ja furfuraalia, bentseenijohdannaisia, hiilivetyjohdannaisia ja fenoleita. Tutkimustulokset tukevat havaintoja ja niiden perusteella voidaan sanoa, että biohiilen varastointi- ja käsittelytiloissa tulee varautua mahdollisesti haitallisiin kaasuihin, joka tulee huomioida käsittely- ja logistiikkaketjun suunnittelussa. TISCO-hankkeen puitteissa tästä aiheesta on lisäksi suunnitteilla lisäselvityksiä Aalto yliopiston Kemian tekniikan korkeakoulussa.

4.2 Itsesyttyminen

Biohiilen itsesyttymisestä ei ole julkaistuja tietoja saatavilla vielä. Asiantuntijakommentit ovat antaneet kuitenkin viitteitä, että biohiilen itsesyttymiseen on varauduttava pitkäaikaisissa ja lämpimissä varastointiolosuhteissa, koska biohiilen itsesyttymislämpötila poikkeaa ulkoilmalämpötilasta melko vähän.

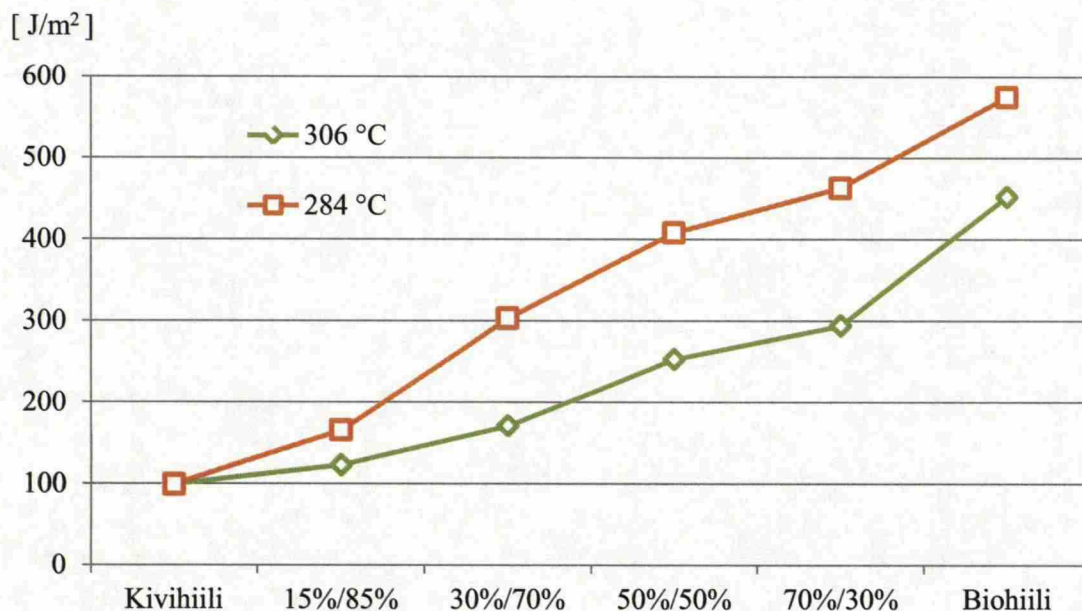
Biohiilen itsesyttymiseen tarvittava materiaalin alkulämpötila alenee materiaalimäärän kasvaessa. Koska biohiilen lämmönjohtavuus on alhainen, jo hidaskin eksotermisen hajoaminen nostaa ajan myötä materiaalin lämpötilaa merkittävästi suurissa varstoissa. Alimmillaan saatavissa olevien tietojen mukaan itsesyttymiseen johtava kehitys alkaa jo 40 °C lämpötilasta.

Biohiilen syttymis- ja itsesyttymisriski on siis mahdollinen varastoinnin aikana, mikä tulee ottaa huomioon varastointi- ja kuljetusketjun suunnittelussa. Itsesyttymis- ja räjähdysvaaran aiheuttavia parametreja tulee huomioida ja arvioida tarkemmin, jotta varmuudella voidaan sanoa miten biohiili käyttäytyy varastoinnissa.

4.3 Jauhatustestit

TISCO – hankkeessa tehtiin myös jauhatuskokeita kahdelle eri biohiililaadulle (torrefiointilämpötilat 284 °C ja 306 °C). Kokeissa testattiin jauhatusta biohiili-kivihiili-seossuhteilla (%) 15/85, 30/70, 50/50, 70/30, 100/0 ja 0/100. Jauhatusergiansiinkulutusta mitattiin jauhatuksessa syntyneen uuden pinta-alan muodostumiseen kuluneella energialla [J/m²].

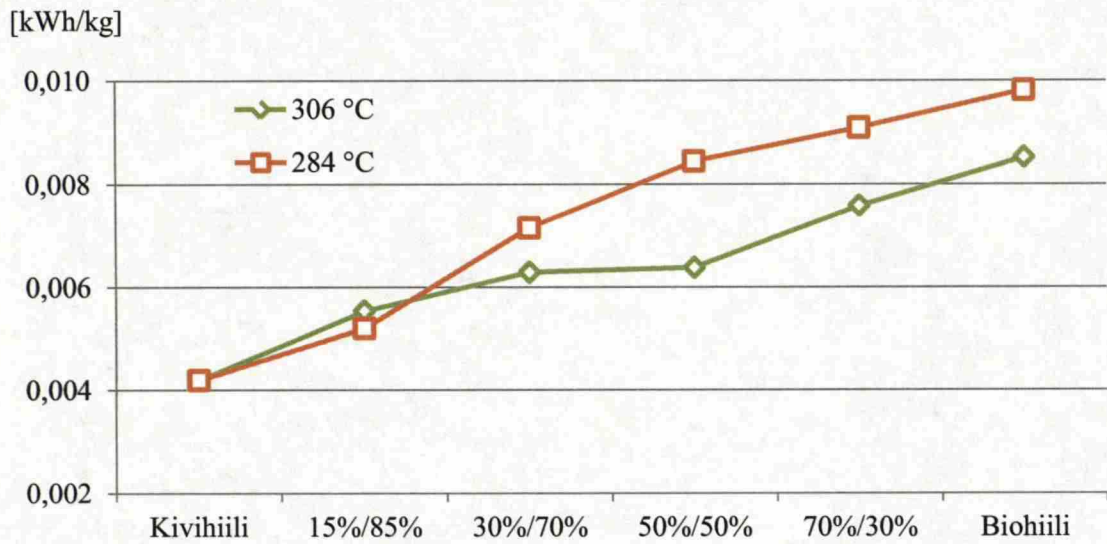
Kuvasta 18 nhdn, kuinka biohiilen osuuden kasvaessa jauhatuksessa syntyneen uuden pinta-alan muodostumiseen kuluu enemmän energiaa suhteessa kivihiileen. Biohiilen jauhamisen energiansiinkulutus on 4 – 5 -kertainen kivihiilen jauhamiseen verrattuna. Huomion arvoista on myös jauhatusergiansiinkulutuksen ero eri paahtoasteilla. Tuloksista huomataan, että torrefiointilämpötilassa 306 C paahdettu biohiili kuluttaa jopa 30 % vähemmän energiaa jauhatuksessa suhteessa torrefiointilämpötilassa 284 C paahdettuun biohiileen. Tulokset tukevat kirjallisuudesta löydettyjä havaintoja.



Kuva 18. Jauhamisenergiansiinkulutus [J/m²] seossuhteen (biohiili/kivihiili, %) funktiona.

Jauhamisenergiansiinkulutusta mitattiin myös tuotantoasteen ja myllyn energiansiinkulutuksen suhteen [kWh/kg]. Tällöin oletetaan, että biohiilen jauhatustulos on riittävä, vaikka tuloksena oleva biohiilijauhe on karkeampaa kuin kivihiili (Kuva 19). Tämän työn

energiataloudellisessa tarkastelussa käytettiin näiden jauhamisenergiankulutusten keskiarvoa.



Kuva 19. Jauhamisenergiankulutus [kWh/kg] seossuhteen (biohiili/kivihiili, %) funktiona.

5. CASE: BIOHIILI SALMISAAREEN

5.1 Tarkastelun tausta ja sisältö

Helsingin Energia ja PVO selvittävät TISCO -hankkeessa biohiilen valmistuslaitoksen rakentamista Kristiinankaupunkiin. Biohiilen valmistuslaitoksessa on tarkoitus käyttää raaka-aineena suomalaista puubiomassaa. Laitoksen tuotantokapasiteetiksi on suunniteltu 100 000 tonnia/vuosi, jonka vastaa energiamäärältään noin 580 GWh. Lähtökohtana tarkastelussa on, että laitoksen tarvitsema biomassa on suomalaista metsähaketta.

Käsittelyn ja logistiikan energiataloudellinen tarkastelu kattaa tässä työssä lähtö- ja tulologistiikan suunnittelun, varastoitavuuden ja käsittelyn sekä kustannusten arvioinnin. Tarkoituksena on tunnistaa energiaa kuluttavat ja kustannuksia tuovat toimenpiteet. Lisäksi on tarkoitus tutkia onko näitä toimenpiteitä mahdollista muokata energiataloudellisimmaksi ja miten biohiilen ominaisuudet tulisi ottaa huomioon niitä tarkasteltaessa.

5.2 Biohiilen tuotanto, käyttö ja varastointi

5.2.1 Kristiinankaupunki

Biohiilen valmistus olisi TISCO – hankkeeseen liittyvien selvittelyiden mukaisesti tarkoitus sijoittaa PVO Lämpövoima Oy:n Kristiinankaupungin voimalaitoksen yhteyteen. Alustavien suunnitelmien mukaan tuotantolaitos olisi tarkoitus kytkeä voimalaitoksen prosessiin (on-site torrefaction) siten, että torrefiointiprosessissa tarvittava lämpö tulisi voimalaitokselta ja siitä syntyvät paahtokaasut voitaisiin hyödyntää voimalaitoskattilassa. TISCO -hankkeessa tehtyjen selvitysten mukaan Kristiinankaupungin läheisyydessä on riittävästi raaka-ainevaroja kattamaan tuotannon tarpeet.

Helsingin Energian Salmisaaren voimalaitos on sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantolaitos, eli niin kutsuttu CHP -laitos, jonka käyttöä ohjataan kaukolämmön kysynnän mukaan. Laitos on tyypillisesti käynnissä syyskuun alkupuolelta toukokuun puoliväliin ja tuotantotehoa säädetään lämmön kysynnän mukaan. Biohiilen käyttö ei ole voimalaitoksen kannalta kriittistä, joten käyttö mukailee tasaista tuotantoa lämmityskaudella. Keskimääräinen suunniteltu biohiilen tuotantomäärä on noin 12 000

t/kk. Tuotanto seisoo toukokuun lopusta elokuun puoleen väliin, jolloin biohiilelle on tarvetta vain 9 kuukauden ajan. Tuotanto käynnistyy hieman ennen lämmityskauden alkua, jotta varastot saadaan täyteen ja loppuu hieman ennen lämmityskauden päättymistä, jotta varastot tyhjäntyvät kesäksi.

Alustavien suunnitelmien mukaan biohiili varastoitaisiin aumana Kristiinankaupungin sataman varastointialueelle, joka olisi edullisin ja helpoin ratkaisu. Biohiilen mahdollisen vettymisen vuoksi sitä ei suositella varastoitavan aumana, vaan laadun takaamiseksi biohiili ja autokuljetuksen lastaustapa vaatii katetun varaston.

Epävarmuudet biohiilen varastokäyttäytymisestä ja hydrofobisuudesta vaikuttavat varastointivaihtoehtoihin. Varastohalli on myös vaihtoehto, mutta biohiilen pölyävä luonne rajaa ainakin tällä hetkellä hallin pois. Biohiilen laadun takaamiseksi ja turvallisuuden vuoksi siilo on tällä hetkellä parhain varastointimuoto biohiilelle. Lisätutkimusten ja käytännön kokeiden jälkeen varastointitapoja voidaan yksinkertaistaa.

Kristiinankaupungin PVO:n tuotantolaitoksen läheisyyteen rakennettavien varastosiilojen suunnittelussa tulee huomioida biohiilelle sopivat lastaus- ja kuljetinratkaisut sekä satamaan että suoraan rekkaan. Kristiinankaupungin päässä tuotantolaitoksen ja Karhusaaren sataman alueella ei ole valmiina minkäänlaista kalustoa, mikä vaatii suuria investointeja projektin edetessä. Tilaa alueella on ja tilan käyttö ei ole kriittinen purku-, lastaus- ja kuljetinratkaisujen suunnittelussa.

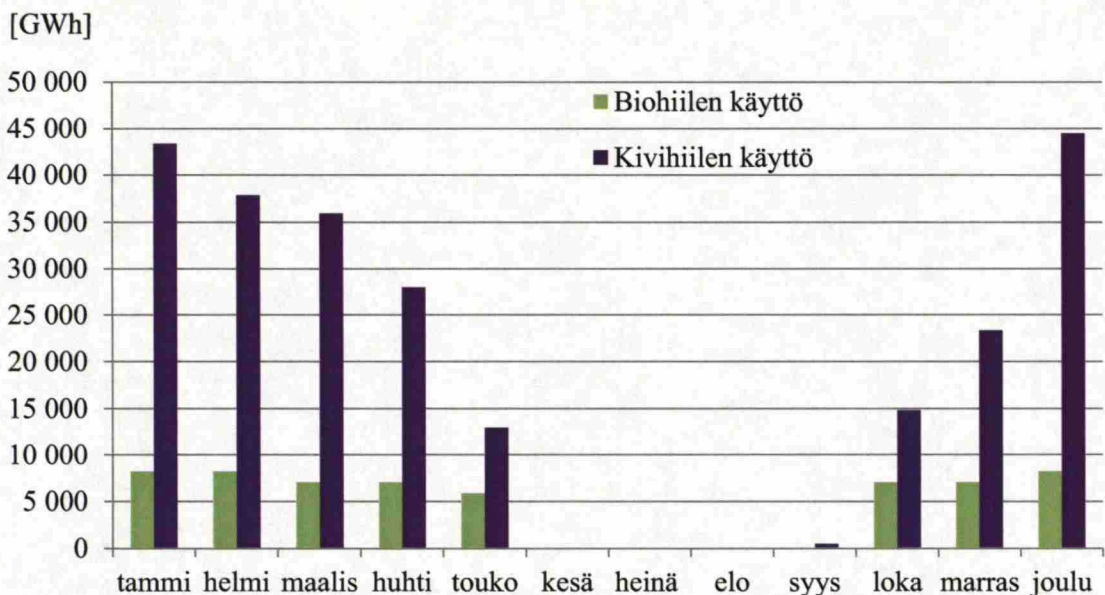
Varastoinvestoinnit ovat välttämättömät tuotantolaitospäähän, mutta kuluja voidaan pienentää optimoimalla varastojen koot mahdollisimman pieniksi. Varastot voisivat vastata esimerkiksi noin 1–2 viikon tuotantomäärää, eli n. 3 000 – 6 000 tonnia. Toisaalta varaston koko voi olla tarpeen optimoida vastaamaan kuljetusmuodon asettamia suuruusluokkia, esimerkiksi irtolastialuksen lastikokoa (4 000 – 6 000 t).

Haastatellun logistiikka-asiantuntijan /75/ mukaan kustannuksiltaan edullisimpaan irtolastialukseen mahtuisi noin 4 000 t biohiiltä, mikä sopisi myös hyvin suhteessa tuotantomäärään. Työssä biohiilen tiheydeksi on oletettu $0,6 \text{ t/m}^3$, jolloin 4 000 – 4 500 tonnia vastaisi noin $7\,500 \text{ m}^3$:n varastotilavuutta ja se voitaisiin toteuttaa esimerkiksi

kolmen siilon yhdistelmällä (3 x 2 500 m³), jolloin kiertoajat olisivat nopeita ja varastossa mahdollisesti aiheutuvat ongelmat voitaisiin helposti rajata ja hallita.

5.2.2 Salmisaari

Biohiili kuljetetaan Kristiinankaupungista Helsingin Energian voimalaitokselle Salmisaareen. Biohiili poltettaisiin Salmisaaren B-voimalaitoksella seoksena kivihiilen kanssa. Salmisaaren B-voimalaitoksella käytetään nykyisin kivihiiltä vuosittain keskimäärin 320 000 tonnia. Biohiilen käyttö vastaisi polttoaine-energialtaan keskimäärin 25 % vuosittaisesta kulutuksesta. Kuvasta 20 nähdään kivihiilen ja biohiilen suunniteltujen energiamäärien jakauma kuukausittain.



Kuva 20. Biohiilen käytön polttoaine-energiamäärän jakautuminen suhteessa kivihiileen käyttöön.

Biohiilestä saatu polttoaine-energian osuus vaihtelee 18 – 48 % voimalaitoksen kuukausittaisesta polttoaine-energiasta. Tässä työssä 50 % on pidetty seososuuden ylärajana, koska biohiili sisältää käytännössä samat kivennäismateriaalit kuin puu ja nämä päätyvät poltettaessa tuhkaan. Puun tuhka aiheuttaa korkealämpötilaisessa voimalaitoskattilassa helposti kuumakorroosiota. Hankkeessa tehtyjen selvitysten mukaan korroosion nopeus on kuitenkin hyväksyttävän pieni, kun biohiilen energiaosuus on polttoaineseoksessa alle 50 %.

Helsingin keskustan tuntumassa sijaitsevalla Salmisaaren voimalaitoksella varastointi maanpäällä on hyvin haastavaa niukkojen tilojen vuoksi. Kivihiilen varastointi tapahtuu nykyisin maanalaisissa siiloissa voimalaitosalueen alla. Tämä maanalainen kivihiilivarasto ja siihen liittyvät järjestelmät ovat valmistuneet Salmisaareen vuonna 2004. Kivihiilivarasto koostuu neljästä 65 metriä korkeasta pystysiilosta, joiden tilavuus on $60\,000\text{ m}^3$ ja joihin mahtuu yhteensä 250 000 tonnia kivihiiltä. Purku siilostoon tapahtuu suoraan Kellosaaren satamasta, kivihiili pudotetaan n. 60–70 metriä pystykuilua pitkin purkutunneliin.

Alun perin tavoitteena on ollut tutkia mahdollisuutta biohiilen varastoinnista kivihiilelle tarkoitetuissa siiloissa. Siilostoa käytettäessä biohiilelle olisi luonnollisinta varata yksi neljästä siilosta, johon biohiiltä ($0,6\text{ t/m}^3$) mahtuisi noin 36 000 tonnia. Tämä vastaa keskimäärin kolmen kuukauden tuotantoa. Biohiilen varastointi kivihiilen kanssa samoihin siilostoihin toisi mittavia etuja, muun muassa sekoitus haluttuun seossuuteen onnistuisi nykyautomaatiikalla.

Ongelmana näissä maanalaisissa siilostoissa on se, että alimmat varastot sijaitsevat noin 120 metriä merenpinnan alapuolella ja siilostoon vuotaa sekä pinta- että merivettä betonivuorauksesta huolimatta. Maanalaisten siilostojen olosuhteet ovat hyvin kosteat, ja jotta biohiilen varastointi olisi mahdollista siilostossa, on kosteus pystyttävä pitämään erossa biohiilestä.

Biohiilen hydrofobisuudesta tarvitaan siis vielä lisätutkimuksia ja -kokeita, ennen kuin päätös varastointiratkaisusta tehdään. Jos biohiilen hygroskooppinen luonne ei ole niin hydrofobinen, kuin kirjallisuudessa on esiintynyt, tulee biohiilipelletin varastointi järjestää katettuihin kuiviin tiloihin, jotta pellettien rakenne ja ominaisuudet säilyvät. Hydrofobisuuden lisäksi Suomen olosuhteissa on tärkeää huomioida pakkasenkestävyys ja sen vaikutukset biohiilen laatuun. Biohiilen pakkasenkestävyyttä ei kuitenkaan ole vielä tutkittu ja lisäkokeita tarvitaan, jotta voidaan arvioida biohiililaadun heikentymistä talven aikana.

Biohiilelle mahdollisesti varattu siilo tulisi reunustaa mahdollisesti vaipalla, joka estäisi kosteuden pääsyn biohiileen. Lisäksi biohiilen mekaaninen kestävyys ei ole riittävä kestääkseen tarvittavan 70 m pudotuksen. Jotta biohiilen varastoiminen maanalaisiin

siilostoihin olisi mahdollista, on muutoksia tehtävä siilojen olosuhteiden lisäksi myös purku- ja kuljetintapoihin. Kellosaaren satamassa ei ole purkukalustoa, vaan kivihiili puretaan itsepurkavilla hiililaivoilla kahmareiden avulla suoraan suppiloon, josta kivihiili pudotetaan purkutunneliin ja sieltä hihnakuljettimilla siilostoihin.

Biohiilen varastointi maanalaisissa siilostoissa on olosuhteiden johdosta mahdotonta, mutta tätä kivihiilelle tarkoitettua purkureittiä voitaisiin mahdollisesti käyttää myös biohiilelle. Tätä kuljetusreittiä pidetään mahdollisena vaihtoehtona, mutta modifiointeja tulee tehdä, jotta biohiili ei murene pudotuksen ja kuljetuksen aikana.

Biohiilen purkaminen kahmareilla ja pudottaminen suoraan siilostoon ei ole vaihtoehto. Kellosaaren satamaan olisi rakennettava erikseen biohiilelle tarkoitettu purkukalusto, esimerkiksi pneumaattinen purkain sekä pystykuljetin/elevaattori tai jokin muu hellävarainen tapa saada biohiili ehjänä maanalaiseen siilostoon. Kuljetinvaihtoehtoina voisi toimia esimerkiksi putkihihnakuljetin, jolla pöly olisi kontrolloitavissa. Tällä hetkellä Salmisaarella kivihiiltä liikutetaan hihnakuljettimilla, jotka sopivat ainakin tämän hetken asiantuntijanäkemyksien mukaan myös biohiilelle. Varmuutta kuitenkin ei ole kuljettimien soveltuvuudesta biohiilelle. Ongelmana saattaa olla pölyäminen ja sen hallinta tulee ottaa huomioon, jos näitä kivihiilelle tarkoitettuja hihnakuljettimia käytetään.

Kivihiili nostetaan siilostosta ruuvipurkaimella ja kumitaskuilla varustetun pystykuljettimen avulla ylös voimalaitosalueelle, jossa se hihnakuljettimilla kuljetetaan voimalaitokseen. Kuljetusratkaisujen soveltumista biohiilelle tulee arvioida erikseen. Mekaaninen rasitus saattaa olla liian suuri näissäkin ratkaisuissa, joten myös tähän vaiheeseen voisi miettiä jotain imuun perustuvaa purkainta mekaanisen purkaimen sijaan.

Kaiken kaikkiaan maanalaisen siiloston tilat, mm. kuilut ja käytävät, johon kivihiili laivasta puretaan ja jossa kivihiilen kuljettimet tällä hetkellä ovat, ovat hyvin ahtaat ja uusien kuljettimien rakentaminen rinnalle vaatii laajennuksia. Suunnittelut ja investoinnit toteutuessaan vaativat vielä lisäselvityksiä biohiilen kestävyysominaisuuksien ja Salmisaaren voimalaitosalueen sisäisen logistiikan osalta. Kaiken kaikkiaan purku- ja kuljetinratkaisujen tulee olla hellävaraisempia ja pöly tulee

olla hallittavissa. Näiden mittavien kivihiilelle tarkoitettujen varastointiin ja kuljetukseen tarvittavien kalustojen hyödyntäminen biohiilelle on haastavaa ja ainakin näin aluksi vaihtoehtoinen varastointiratkaisu tulisi tarkemmin selvittää.

Siiloston käytön ohella on mietitty mahdollista proomuvarastointia satamassa, jolloin biohiili saataisiin suoraan voimalaitoksen päiväsiiloille (4 kpl 1400 m³). Tällöin voitaisiin ohittaa varastointi maanalaiseen siilostoon, mutta ohitus ei kuitenkaan poista pudotuksen tarvetta. Proomuvarastoinnissa haasteena lisäksi on kosteuden erossa pitäminen biohiilestä sekä sen varastokäyttämisen hallinta. Proomuvarastointivaihtoehto on monella tapaa haasteellinen, eikä onnistu ilman muutoksia sataman purkulaitteistossa ja -tavassa.

Tämän hetkisten varastointiominaisuusselvitysten valossa olisi biohiili syytä varastoida kuivassa tilassa, jossa pöly ja mahdolliset palo- ja räjähdysriskit ja kosteuden pito biohiilestä erossa olisivat hallittavissa. Novox Oy:n tekemien esiselvitysten mukaan voimalaitosalueelle mahtuisi kaksi 2 500 m³ siiloa, jotka vastaisivat keskimäärin parin päivän biohiilen käyttötarvetta (kuva 21). Maantiekuljetuksilla nämä pienet käyttövarastot (esim. 2 kpl 1 000–2 500 m³ siiloja) maanpäällä tehostaisivat biohiilen käyttöä ja vähentäisivät biohiilelle aiheutuvaa mekaanista rasitusta, kun käsittely- ja kuljetinvaiheet yksinkertaistuvat. Varaston tehtävänä on käytännössä toimia JOT-tyylisenä ”juuri oikeaan tarpeeseen” varastona, josta syötetään biohiili voimalaitokseen öisin, viikonloppuisin ja muina kansallisina vapaapäivinä, jolloin ympäristölupa rajoittaa toimitusten tuomista voimalaitokselle.

Salmisaaren voimalaitoksen ympäristölupa rajoittaa polttoainetoimituksia arkipäivien ulkopuolella. Salmisaaren polttoainesatamassa saa tehdä lastin purkaustoimintaa arkisin kello 7–22 sekä poikkeuksellisesti lastin käsittelyn vaatiessa pakottavista syistä myös muulloin. Maantiekuljetuksia ei ole rajoitettu näin tiukasti, mutta pääasiassa biohiilen kuljetus tulisi tapahtua ympäristöluvan mukaisesti. Tälläkin hetkellä Salmisaareen kulkee autoja ympäri vuorokauden. Melu saattaa rajoittaa maantiekuljetusta öisin. Eli yleisiä melurajoja ei saa ylittää ja mikäli liikenne lisääntyy yöaikaan niin tästä voi tulla rajoittava tekijä. Lisäksi lisääntyviä liikennemääriä vastustetaan paikallisesti.

Kaiken kaikkiaan biohiili ei tällä hetkellä ole kriittinen voimalaitoksen toiminnan kannalta, joten Salmisaaren voimalaitosalueelle ei ole tarpeen rakentaa suuria käyttövarastoja biohiilelle. Tavoitteena on kuitenkin korvata merkittävä määrä kivihiilen käyttöä bioenergialla, jolloin tulevaisuudessa mahdollisesti biohiilen käytön osuus kasvaa huomattavasti ja sen merkitys kasvaa voimalaitoksen toiminnassa.

Maanpäällisten varastotilojen niukkuus, maanalaisten siilostojen olosuhteiden ja voimalaitoksen sisäisen logistiikan haastavuus biohiilelle asettavat biohiilen toimituksille rajoituksia. Toimituslogistiikan yksipuolisuuden ja haasteellisuuden takia liittyy biohiilen toimitusvarmuuteen riskejä, kuten lakko ja sääolosuhteet.

Tulevaisuudessa biohiilen/bioenergian käytön muuttuessa yhä merkittävämmäksi ja osaltaan myös kriittisemmäksi osaksi toimintaa, on Salmisaaressa mietittävä polttoaineiden varastointiratkaisuja. Kuten mitä polttoainetta varastoitaisiin varmuusmielessä, varmuusvarastojen sijaintia ja varastoinnin kestoja.

5.3 Biohiilen toimitus- ja kuljetusskenaariot

Biohiiltä olisi tarkoitus kuljettaa Kristiinankaupungista Salmisaareen. Mahdollisina kuljetusvaihtoehtoina on tarkasteltu meri-, rauta- ja maanteitse tapahtuvaa kuljettamista. Kuljetusmuodon valinnan kannalta oleellista on huomioida energiataloudellisuus ja mahdollinen jo olemassa oleva infrastruktuuri sekä kustannukset.

Kuljetusmuodoista Salmisaaren osalta on mahdollista käyttää vain maantie- ja meritiekuljetuksia. Rautatiekuljetus on poissuljettu raiteiden puuttumisen johdosta ja raideliikenteen investoinnit olisivat erittäin merkittävät jo puutteellisesta rataverkosta alkaen. Päätepisteen ja sinne johtavien kulkuväylien osalta raideliikennettä on käytännössä mahdotonta toteuttaa.

Kuljetusskenaariotarkastelussa on kaksi vaihtoehtoa. Joko suora kuljetus Kristiinankaupungista Salmisaareen tai vaihtoehtoisesti varastoinnin toteutus voimalaitosalueen ulkopuolella, jolloin biohiili kuljetettaisiin ensiksi voimalaitoksen lähellä sijaitsevaan satamaan, varastoitaisiin siellä välivarastoon ja kuljetettaisiin sitten sen kautta Salmisaareen.

Suomen olosuhteissa talvi aiheuttaa muutoksia ja rajoituksia kuljetusmuodoille. Vaihtoehtoisia ja korvaavia kuljetusmuotoja voidaan tietysti tarkastella talvikuljetuksen osalta. Kustannustehokkainta olisi kuitenkin käyttää samaa kuljetusmuotoa vuoden ympäri ja keskittää laivakuljetukset talvisatamiin, jotka ovat vuoden ympäri avoinna.

Taulukko 8. Kuljetusskenaarioiden keskimääräiset etäisyydet.

Etäisyydet		
Kristiinankaupunki - Salmisaari (maantie)	340	km
Kristiinankaupunki - Salmisaari (meritie)	460	km
Kristiinankaupunki - Inkoo (meritie)	400	km
Inkoo - Salmisaari (maantie)	60	km

5.3.1 Kristiinankaupunki – Salmisaari

Salmisaaren voimalaitos sijaitsee vilkkaasti liikennöidyllä kaupunkialueella. Maantiekuljetukset tapahtuisivat Porkkalankadun kautta ja ajallisesti ympäristölupien edellyttäminä ajankohtina arkipäivisin. Salmisaaren voimalaitoksella pellettien syöttö tapahtuisi rekkojen purkupisteen ja varastosiilon kautta. Varaston kierrättäminen on tärkeää, erityisesti kun biohiili voi olla epästabiilia materiaalia.

Maanteitse matkan pituudeksi tulisi noin 340 km. Tarkastelujen mukaan autokuljetukset vaatisivat ainakin lähtöpisteeseen lisäinvestointeja lastaussiilojen ja niihin liittyvien laitteiden muodossa. Päätepisteen ajoneuvologistiikka alueella on haastavaa; teknisten haasteiden lisäksi autokuljetuksilla on paikallista vastustusta.

Meriteitse matkan pituudeksi tulisi noin 450 km. Laivakuljetusta tukee puolestaan Kristiinankaupungin tuotantopaikan sijainti, joka on ihan Karhusaaren sataman tuntumassa. Tämän lisäksi meritiekuljetusta puoltaa hyvät yhteydet Salmisaaren päässä ja jo valmiina olevat kivihiilen siirtoon tarkoitetut kuljettimet ja purkausvälineet. Salmisaaren voimalaitoksen sisäisen logistiikan haastavuus rajaa tällä hetkellä aluskuljetuksen pois.

5.3.2 Kristiinankaupunki – Välivarasto – Salmisaari

Salmisaaren niukat varastotilat ja Tammasaaren polttoainesataman biohiillelle soveltumaton purkutunneli rajoittavat biohiilen kuljetusta ja varastointia

voimalaitosalueella. Tämän vuoksi yhtenä skenaariovaihtoehtona on ajateltu välivaraston sijoittamista voimalaitosalueen ulkopuolelle. Varteenotettavana ratkaisuna olisi kuljetus toisen sataman kautta, jossa toimisi samalla myös suurempi välivarasto. Näin biohiili voitaisiin kuljettaa irtolastialuksella satamaan ja varastoida siellä, ja sieltä rekkakuljetuksin kuljettaa tarpeen mukaan biohiiltä voimalaitosalueelle pienempään käyttövarastoon.

Varastotilojen niukkuuden ja purkukaluston rajoitusten lisäksi kumpikaan Kristiinankaupungin eikä Salmisaaren satamista ole talvisatamia, joten myös meren/satamien jäätyminen talvella saattaa rajoittaa kuljetuksia ja jopa johtaa kuljetusten keskeytymiseen. Molemmat satamat ovat talvisin keskimäärin tammi-maaliskuun välisen ajan kiinni. Salmisaaren päässä kivihiilen laivaus toteutetaan tämän ajan ulkopuolella ja siihen varaudutaan varastoimalla etukäteen ja riittävien varastointisiilojen ansiosta keskeytys ei vaikuta voimalaitoksen käyttöön. Mutta biohiilelle ei voimalaitosalueelta tällaisia puskurisiilostoja löydy eikä niitä ole mahdollista rakentaa, joten välivarasto talvisataman yhteydessä olisi hyvä ratkaisu koko toimitusketjun varmuudelle ja tehokkuudelle.

Välivarasto toimisi päävarastona biohiilen kuljettamiseen käytetyn sataman alueella, jotta mahdollisimman vähän tilaa vievä käyttövarasto olisi mahdollinen toteuttaa Salmisaarella. Terminaalivaraston kokoluokka vastaisi tuotantolaitoksen varastojen kokoa eli noin viikon - kahden biohiilen tuotanto- ja käyttömäärää.

Kristiinankaupungin satama ei ole tällä hetkellä talvisatama, mutta kasvavilla kuljetusvolyymeilla sitä on mahdollista pitää auki myös talvisin. Tämä edesauttaa ja lisää vaihtoehtoja biohiilen kuljettamiseen Kristiinankaupungista. Biohiiltä voitaisiin kuljettaa Salmisaaren läheisyydessä olevaan talvisatamaan, kuten esimerkiksi Inkooseen.

Inkoon satama sijaitsee noin 55 km päässä Salmisaaresta. Inkoolla on hyvät edellytykset selvittää kasvavista volyymeista myöhemmin, mutta sen rasiitteena on pitkä maantiekuljetus. Inkoon satamalla on hyvät mahdollisuudet suoriutua kasvavista volyymimääristä myös pitkällä aikavälillä, koska väylien syvyydet ovat hyvät ja lisäksi

varastotiloista ei ole puutetta. Satama omistaa maa-alueet, laajennusvaraa on ja talviliikenneolosuhteet ovat otolliset.

6. TUTKIMUKSEN SUORITUS JA TULOKSET

Tässä työssä kehitettiin käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutuksia tarkasteleva laskentamalli, jonka avulla voitiin huomioida eri muuttujat ja niihin vaikuttavat parametrit. Biohiilen logistiikkaketjun energiataloudellisessa tarkastelussa määritettiin case-tapauksen asettamien rajojen puitteissa eri kuljetusvaihtoehtojen energiankulutukset ja kustannuksia Kristiinankaupungin tuotantolaitokselta Salmisaaren voimalaitokselle. Lisäksi tarkasteluun sisältyi käsittelyketjun energiataloudellinen tarkastelu, joka huomioi pelletöinnin, varastoinnin ja jauhatuksen energiankulutukset.

6.1 Tutkimuksen suoritus

Energiataloudellinen tarkastelu suoritettiin kehitettyä laskentamallia käyttäen. Tarkastelussa käytettiin energiankulutusarvoina sekä kirjallisuudesta että TISCO-hankkeen tutkimustuloksista saatuja arvoja. Tavoitteena oli laskea 1 MWh energiaa sisältävän biohiilierän käsittelyssä ja kuljetuksessa tarvittavan energian määrä. Sähkön kulutus muutettiin polttoaine-energiankulutukseksi kertoimella 2,5 mikä vastaa sähköntuotannon hyötysuhdetta 40 %. Kuljetusvälineiden nestemäisten polttoaineiden sisältämän energiankulutus otettiin laskelmaan ilman muuntokertoimia. Tällä laskentatavalla saadaan energiankulutukselle lukuarvo, jota voidaan verrata käsiteltävän polttoaineen sisältämään energiamäärään.

Taulukosta 9 nähdään biohiilen tuotannon lähtötiedot ja polttoaineominaisuudet. Tuotannon vuosittainen käyttöaika arvioitiin olevan syyskuun lopusta toukokuun alkuun, lämmityskauden mukaisesti. Vuosittainen tuotantomäärä, 100 000 tonnia oli oletusarvona tässä tarkastelussa. Biohiilen energiatekniset ominaisuudet arvioitiin kirjallisuudesta saaduista arvoista, joista laskettiin 1 MWh sisältämän biohiilierän massa. Hankkeen puitteissa saatujen arvioiden mukaan, tiheys jätettiin tietoisesti alhaiseksi, puupelletin tasolle, koska tavoitteena oli saada realistinen käsitys käsittely- ja logistiikkaketjun toiminnasta. Tiheyden vaikutus logistiikan tehokkuuteen on ilmeinen ja energiataloudellisen tarkastelun ohella suoritettiin myös tiheyden herkkyysanalyysi, jonka tulokset on esitetty kappaleessa 6.2.3.

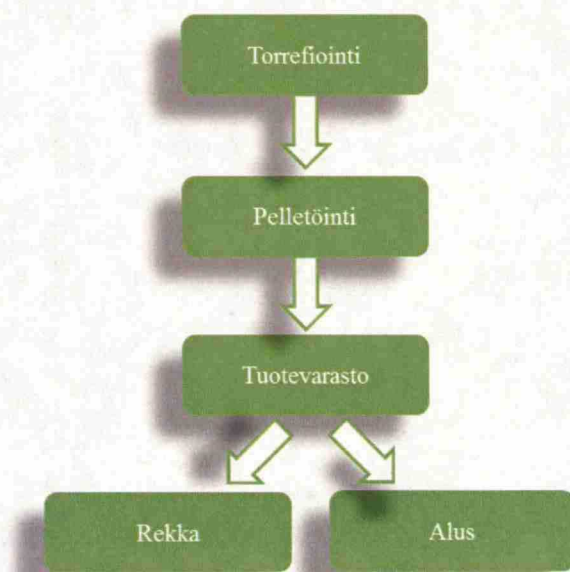
Taulukko 9. Biohiilen energiataloudellisen tarkastelun lähtötiedot.

Tuotanto		
Käyttöaika	6 000	h/a
Tuotantomäärä	100 000	t/a

Biohiili		
Energiamäärä	1	MWh
LHV saap.tila	21	MJ/kg
	5,8	kWh/kg
Erän massa	171	kg/MWh
Tiheys	600	kg/m ³
Energiatiheys	12,6	GJ/m ³

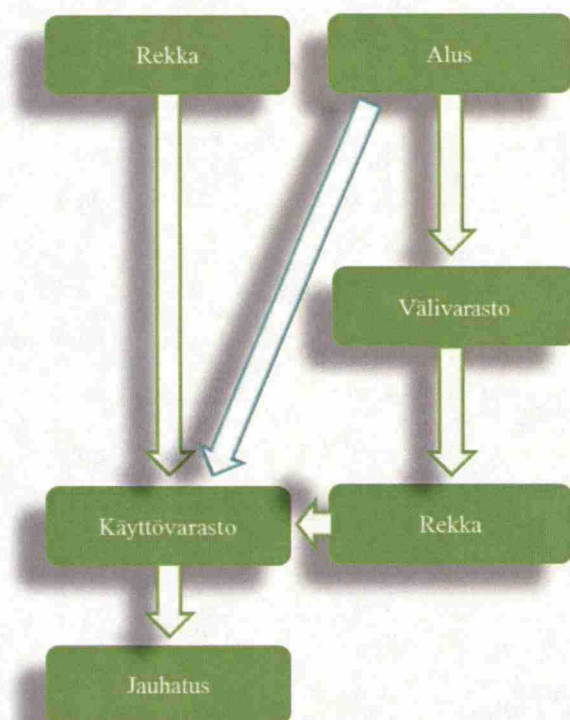
Tutkimukseen rajattu biohiilen käsittely- ja logistiikkaketju alkaa torrefiointin jälkeen ja päättyy jauhatukseen, sisältäen kuljetus- ja varastointivaiheet. Torrefiointia ei sisällytetty tarkasteluun.

Ketjun alkupää käsittää torrefiointin jälkeen tapahtuvan pelletöinnin sekä tuotevarastoinnin, päättyen kuljetusmuodon valintaan, joissa kuljetusskenaarioina tarkastellaan maantie- ja vesitiekuljetusta, kuva 22.



Kuva 22. Biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun alkuosa.

Kuvasta 23 nähdään biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun case-tapauksen asettamien rajoitusten mukaiset kuljetusskenaariot. Biohiilen koko käsittely- ja logistiikkaketju päättyy jauhatukseen voimalaitoksella.



Kuva 23. Biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun loppuosa

Käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutusten arvioinnissa käytettiin kirjallisuusarvoja sekä hankkeen aikana tehtyjen selvitysten tutkimustuloksia. Käsittelyketju kattaa biohiilen osalta pelletöinnin ja jauhatuksen ja logistiikkaketju kuljetuksen ja varastoinnin. Pelletöinnin energiankulutuksen arvioinnissa käytettiin kirjallisuustutkimuksesta /42/ saatuja tuloksia. Jauhatuksen energiankulutusarvot olivat TISCO-hankkeen puitteissa tehtyjen jauhatustestien tuloksia. Varastoinnin energiankulutuksen arviot laskettiin Novox Oy:n energiankulutusarvioiden mukaisesti. Kuljetusmuotojen energiankulutuksien laskennassa hyödynnettiin VTT:n LIPASTO - laskentajärjestelmästä /63/ saatuja arvoja.

6.2 Tutkimustulokset

6.2.1 Käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutus

Biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiataloudellisen tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 10. Tulostaulukosta nähdään, että erot eri kuljetusskenaarioiden välillä ovat hyvin pienet, vaikka rekkakuljetus on yksikkötasolla energiaa kuluttavin kuljetusmuoto. Kuljetusmatka on suhteellisen lyhyt, minkä vuoksi energiataloudellisesti merkittäviä energiankulutuseroja ei muodostu. Lisäksi kuljetusmuotojen energiakulutuksien erot tasoittuvat kuljetuksen aikana, kun kuljetusetäisyys kasvaa meriteitse yli 100 km maantiekuljetusta pidemmäksi.

Taulukko 10. Biohiilen käsittelyn ja logistiikan polttoaine-energiankulutukset kuljetusskenaarioittain.

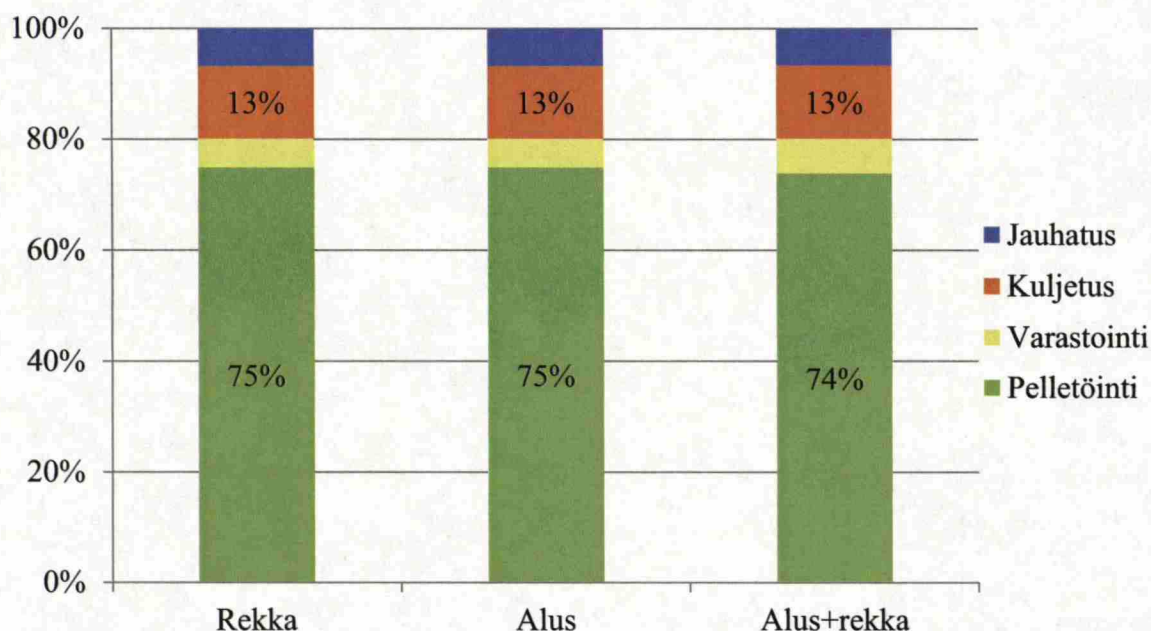
Energiankulutukset [kWh/MWh]	Rekka (340 km)	Alus ¹⁾ (460 km)	Alus ¹⁾ + Rekka (430km + 30km)
Pelletöinti ²⁾	42,9	42,9	42,9
Varastointi ²⁾	3,0	3,0	3,6 ³⁾
Kuljetus	7,4	7,4	7,6
Jauhatus ²⁾	3,9	3,9	3,9
yht.	57,2	57,2	58,0
Biohiilen polttoaine-energiamäärästä	5,7 %	5,7 %	5,8 %

¹⁾ Pieni irtolastialus, GT 3 000

²⁾ Sähkön primäärienergia muutettu polttoaine-energiaksi kertoimella 2,5

³⁾ Sisältää välivarastoinnin

Käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutuksen osuus on kaikissa kuljetusskenaarioissa alle 6 % biohiilen polttoaine-energiamäärästä. Kuljetuksen osuus tästä jää alle 15 prosenttiin, kun pelletöinnin osuus on tästä jopa 75 %, kuva 24.



Kuva 24. Energiankulutuksien jakaumat kuljetusmuodoittain.

Tarkastelumalli voidaan yleistää muihinkin kuljetusmuotoihin, jolloin rautatiekuljetuksen voi ottaa myös mukaan tarkasteluun. Tästä tarkastelusta se jätettiin huomioimatta raiteiden puuttumisen vuoksi, koska energiankulutusten ja kustannusten arviointi puutteellisen infrastruktuurin vuoksi oli mahdotonta. Lisäksi suhteellisen lyhyen etäisyyden vuoksi junan ja rekan yhdistelmäratkaisu olisi ollut kustannustehoton ja vaikeasti toteutettavissa oleva ratkaisu sekä alku- että loppupäässä, joten tarkastelua ei suoritettu tälle vaihtoehdolle.

6.2.2 Käsittely- ja logistiikkaketjun kustannukset

Energiankulutuksissa eri kuljetusskenaarioiden välillä olivat hyvin pienet erot. Taulukosta 11 nähdään eri kuljetusmuotojen kustannukset, mistä huomataan merkittävät erot eri kuljetusmuotojen kustannusten välillä. Rautatiekuljetus otettiin mukaan yleisellä tasolla kustannustarkasteluun, jotta saadaan selkeä kuva maantie-, rautatie- ja meritiekuljetusten kustannuseroista. Maantie- ja merirahdin kuljetuskustannusarviot perustuvat asiantuntijoiden /75/ antamiin hinta-arvioihin. Rautatiekuljetuskustannukset perustuvat Metsätilastollisen vuosikirjan /64/ tilastoihin.

Taulukko 11. Biohiilen (5,8 MWh/t) kuljetuskustannukset. /64, 77/.

	€/t	€/MWh
Juna ¹⁾ (340 km)	13 – 14	2,2 – 2,4

Kristiinankaupunki – Salmisaari	€/t	€/MWh
Rekka (340 km)	25 – 26	4,3 - 4,5
Pieni irtolastialus ¹⁾²⁾ (460 km)	12 – 13	2,1 - 2,2

Kristiinankaupunki – Inkoo – Salmisaari	€/t	€/MWh
Pieni irtolastialus ¹⁾ (430 km)	12 – 13	2,1 - 2,2
Rekka (55 km)	7,9	1,4
yht.	19,9 – 20,9	3,5 – 3,6

¹⁾ Olettaen, että infrastruktuuri on olemassa

²⁾ Tarkasteluaikajankohtana (02/2013) merirahdit ovat poikkeuksellisen alhaisella tasolla

Kuljetusskenaarioiden kustannusarvioissa ei ole huomioitu tuotanto- eikä voimalaitospäähän tehtäviä tuote- ja käyttövarastoja. Kustannuslaskelmissa tulisi kuitenkin ottaa huomioon kuljetusmuodon infrastruktuurivaatimukset ja investoinnit. Suorassa aluskuljetuksessa investointikustannukset sisältävät voimalaitospäähän tehtävät sisäisen logistiikan mittavat muutokset. Alus- ja rekkakuljetusskenaariossa lisäkuluja tuo investoinnit välivarastoihin sekä vaihtotyökustannukset läheisessä satamassa. Vaikka tulosten mukaan rekkakuljetus on kuljetuskustannuksiltaan kallein vaihtoehto, on suora rekkakuljetus ainut vaihtoehto, jossa suurempia investointeja ei tarvitse tehdä. Tämä laskee kokonaiskustannusten määrää huomattavasti. Investointi- ja vaihtotyökustannuksiin tulisi tehdä erilliset kustannusselvitykset, jotta tarkkoja arvioita koko logistiikkaketjun kustannuksista voidaan antaa.

6.2.3 Tiheyden herkkyysanalyysi

Tiheyden herkkyysanalyysillä arvioidaan biohiilen tiivistämisen vaikutusta biohiilen käsittelyn ja kuljetuksen energiatehokkuuteen ja kustannuksiin. Herkkyysanalyysissä muutettiin tiheyden arvoja ja muut oletukset pidettiin vakiona. Sen avulla pyrittiin selvittämään, kuinka herkkä mallin tulos on tiheyden muutoksille.

Energiataloudellisessa tarkastelumallissa tiheytenä on käytetty $0,6 \text{ t/m}^3$, joka on suhteellisen alhainen suhteessa kirjallisuudessa oleviin arvoihin ($0,75\text{--}0,85 \text{ t/m}^3$). Tämän herkkyysanalyysin tarkoituksena on tutkia tiheyden muutoksen $0,6 \text{ t/m}^3 \pm 30 \%$ ($0,4 \text{ t/m}^3$ ja $0,8 \text{ t/m}^3$) vaikutusta käsittelyn ja logistiikan energiankulutuksiin ja kustannuksiin.

Herkkyysanalyysin tavoitteena on arvioida tiheyden muutoksien vaikutusta eli riippuvuussuhteita ja onko tiheyden nousulla saavutetut logistiset säästöt kuljetuksen ja varastoinnin aikana suurempia kuin siitä pelletöinnissä ja jauhatuksessa aiheutuvat lisäkulut. Pelletöinnissä ilmenneiden ongelmien vuoksi on mahdollista, että kirjallisuudessa esiintyvien tiheyksien saavuttaminen vie paljon energiaa eikä siitä saadut logistiset hyödyt välttämättä kata pelletöinnistä aiheutuvia lisäkustannuksia.

Tiheyden vaikutusta käsittely- ja logistiikkaketjun tehokkuuteen ja kannattavuuden arvioitiin käsittelyvaihe- ja kuljetusmuotokohtaisesti. Taulukosta 12 nähdään, rekka- ja junakuljetusten osalta paino- ja tilavuusrajat, joiden avulla voidaan laskea kuljetusmuotokohtainen minimitiheys. Minimitiheys kuvaa pienintä tiheyttä, jolla kuljetusmuodon koko kantavuus saadaan hyödynnettyä.

Taulukko 12. Rekka- ja junakuljetusten minimitiheys.

		Juna	Rekka
Painoraja	t	1220	40
Tilavuus	m^3	2760	120
Minimitiheys	t/m^3	0,44	0,33

Taulukosta 13 nähdään yhteenveto tiheyden nousun vaikutuksista eri käsittely- ja logistiikkaketjun vaiheisiin. Tiheyden nousu ei tuo rekka- ja junakuljetusten osalta kuljetuskustannuksiin säästöjä korkeammilla tiheyksillä. Maantiekuljetuksiin tiheyden muutokset eivät vaikuta tällä välillä ($0,4 - 0,8 \text{ t/m}^3$) ollenkaan. Vaikutukset huomataan rautatiekuljetuksen kuljetusmäärissä vasta tiheyden laskiessa alle $0,44 \text{ t/m}^3$.

Taulukko 13. Yhteenvedo tiheyden nousun vaikutuksista käsittelyn ja logistiikan energiankulutuksiin ja kustannuksiin.

Rekka	±	Ei muutosta kuljetusmäärissä, minimitiheys 0,33 t/m ³
Juna	±	Ei muutosta kuljetusmäärissä, minimitiheys 0,44 t/m ³
Laiva	±/+	Kuljetusmäärät pienyvät hieman, minimitiheys luokkaa 0,65 t/m ³
Varastointi	++	Varastointitarve pienenee, varastointikustannussäästöjä
Jauhatus	±	Marginaalisen pieni vaikutus
Pelletointi	–	Energiankäyttö lisääntyy, lisäkustannuksia

Irtolastialusten minimitiheyttä ei pystytä laskemaan täsmällisesti maantie- ja rautatiekuljetusten tavoin, koska laivojen kantavuudet ja lastitilojen tilavuudet ovat laivakohtaisia. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että irtolastialusten kantavuudet ovat rekka- ja junakuljetuksia korkeammat. Keskimääräisesti pienen irtolastialuksen (4 000 – 6 000 t) minimitiheys on luokkaa 0,65–0,7 t/m³.

Kuljetuskustannussäästöjä ei verrata samassa suhteessa tiheyden muutoksiin, koska kantavuudet tulevat kaikissa kuljetusmuodoissa vastaan. Varastointimääriin tiheyden muutoksilla on kuitenkin suora vaikutus ja siten varastointikustannuksiin. Tiheyden nousu vaikuttaa pelletöinnin lisäksi myös jauhatukseen, koska mitä tiheämmässä paketissa biohiili on, sitä enemmän energiaa kuluu sen jauhamisessa. Ilman yksityis- ja tapauskohtaisia varastointi- ja kuljetuskustannuslaskelmia sekä pelletointi- ja jauhamisenergiankulutuksien selvityksiä on säästöjen suuruutta vaikea arvioida.

6.3 Tutkimustulosten tarkastelu

Eri kuljetusskenaarioiden energiankulutuksissa ei suurta eroa kuljetusmuotojen välillä ollut. Rautatiekuljetus jätettiin case-tapauksen vuoksi käsittelemättä, mutta yleisellä tasolla tehdyissä tarkasteluissa, on rautatiekuljetus hyvä vaihtoehto näille kuljetusetäisyyksille, jos infrastruktuuri on valmiina. Arvion mukaan energiankulutus on jopa 40–50 % ja parhaimmassa tapauksessa kustannukset kolmasosan pienempiä verrattuna maantiekuljetukseen. Rautatiekuljetus olisi varteenotettava vaihtoehto välillä, jossa raiteet olisivat alusta loppuun. Lisäksi kuljetettaessa biohiiltä sisämaasta

ulkomaille, voisi rautatiekuljetuksen yhdistää aluskuljetukseen, jolloin saataisiin koko logistiikkaketjun kannalta kannattava ja tehokas ratkaisu.

Case-tapauksen realistisista kuljetusvaihtoehdoista kuitenkin maantiekuljetus osoittautui kannattavimmaksi vaihtoehdoksi näillä rajoituksilla. Maantiekuljetuksen etuna on sen lyhyen reitin lisäksi sen joustavuus. Vaikka meritiekuljetus on maantiekuljetusta energiataloudellisesti järkevämpää, eivät pienen irtolastialuksen edut erotu näin lyhyellä matkalla. Merikuljetusreitti on suhteessa maantiekuljetukseen paljon pidempi, joka myös vaikuttaa tuloksiin. Aluskuljetuksen suoraan Salmisaareen -kuljetusskenaarion rajaa tällä hetkellä pois Salmisaaren voimalaitoksen sisäisen logistiikan haasteellisuus biohiilelle. Tämän lisäksi talviolosuhteet vaikeuttavat kuljetusta talvisin Salmisaareen.

Tällä hetkellä kuljetusmuodon valintaan vaikuttaa lisäksi tarvittavien investointien määrä, eri kuljetusmuotovalinnat vaativat lisäinvestointeja sekä varastoihin että kuljettimiin. Vaikka rekkakuljetus on kuljetuskustannuksiltaan (€/t) kallein vaihtoehto, on se kaiken kaikkiaan tällä hetkellä ja olemassa olevassa infrastruktuurilla edullisin vaihtoehto. Aluskuljetuskustannuksiin tuo huomattavia lisäkustannuksia joko investoinnit välivarastoihin tai Salmisaaren päässä sisäisen logistiikan kehittämiseen. Välivarastoskenaariossa kustannuksia tuo lisää myös kuljetusmuodon vaihdon aiheuttamat vaihtotyöt. Nämä investointikustannukset nostavat kokonaiskustannukset hyvin korkealle, jolloin rekkakuljetus on kustannustehokkain vaihtoehto tälle välille tällä hetkellä.

Tulevaisuudessa, jos biohiilen käyttöä lisätään, on nämä haasteet syytä ratkaista, koska suora aluskuljetus on kuitenkin energiataloudellisin ja kustannustehokkain vaihtoehto pitkällä tähtäimellä. Kuljetuskustannukset putoaisivat merkittävästi, kun rekkakuljetuksista siirryttäisiin suoraan aluskuljetukseen. Investointilaskelmat Salmisaaren voimalaitoksen sisäisen logistiikan muutoksista ja kehittämisestä biohiilelle sopivaksi tulee suorittaa ennen kuin investointien kannattavuutta voidaan tarkastella.

Tarkasteluajankohtana merirahtihinnat ovat olleet poikkeuksellisen alhaalla. On todennäköistä, että merirahtien hinnat eivät pitkällä aikavälillä ole näin edullisella tasolla. Mahdolliset tulevaisuuden korkeat merirahtihinnat puoltavat lyhyillä ja keskipitkillä matkoilla maantie- ja rautatiekuljetuksiin. Irtolastialuksesta saatava hyöty

kasvaa vasta pitkillä matkoilla ja suurilla volyymeilla. Salmisaaren päässä tämä tarkoittaa yleisellä tasolla sitä, että voimalaitoksen sisäisen logistiikan muutosinvestoinnit ovat kannattavia, jos biohiilen käyttövolyymit kasvavat ja biohiiltä tuodaan voimalaitokselle myös meriteitse Kristiinankaupunkia kauempaa.

Kuljetusmuotojen välillä ei suuria eroja energiataloudellisesti katsottuna ole. Tärkein huomio kuitenkin energiataloudellisessa tarkastelussa on pelletöinnin merkittävä osuus koko käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutuksesta. Tutkimustulokset antavat suuntaa torrefioidun biomassan pelletöinnin kehitystarpeelle ja lisätutkimukselle, koska yksityiskohtainen ja tarkka energiataloudellinen vertailu vaatii paljon lisää tutkimustuloksia torrefioidun biomassan käyttäytymisestä pelletöinnissä. Pelletöinnin haasteet tulee ylittää ennen kuin tehokas käsittely- ja logistiikkaketju on mahdollinen toteuttaa.

Lisäksi pelletöinti vaikuttaa tiheyteen ja täten koko käsittely- ja logistiikkaketjuun. Yleisesti on tunnettua, että polttoaineen tiheydellä on merkittävä vaikutus logistiikkaketjun tehokkuuteen. Logistiset edut tuovat merkittäviä säästöjä niin kuljetus- että varastointikustannuksissa. Yleisesti ottaen, mitä energiatiheämpää polttoaine on, sitä paremmin se mahtuu pienempään tilaan sekä kuljetusmuodossa että varastosiilossa. Voidaankin sanoa, että tiheyden muutokset (%) vaikuttavat samassa suhteessa kuljetus- ja varastointitarpeeseen ja sitä kautta lopulta kustannuksiin. Tämän vuoksi tiheyden muutoksia tarkasteltiin herkkyyksianalyysin avulla.

Herkkyyksianalyysin avulla havaittiin tiheyden muutosten vaikutus käsittely- ja logistiikkaketjuun. Kuten energiataloudellisen tarkastelun tuloksista nähtiin, on pelletöinti kriittinen osa koko ketjua. Pelletöinnissä ilmenneiden ongelmien vuoksi on mahdollista, että kirjallisuudessa esiintyvien tiheyksien saavuttaminen vie paljon energiaa eikä siitä saadut logistiset hyödyt välttämättä kata pelletöinnistä aiheutuvia lisäkustannuksia. Jos case-tapaukseen valittaisiin rekkakuljetus energiataloudellisesti ja kustannuksiltaan parhaaksi vaihtoehdoksi, eivät skenaarion kuljetuskustannukset muutu tiheyden nousun mukana. Tiheyden nousu vaikuttaisi vain varastointiin ja käsittelyihin. Tiheyden nousun tuomia varastointikustannuksien säästöjä tulisi verrata pelletöinti- ja jauhatuskustannusten nousuun.

Tällä hetkellä herkkyyksianalyysiä on vaikea tarkentaa ilman kustannusarvioita koko käsittely- ja logistiikkaketjun osalta. Tarkkoja arvioita miten paljon tämä $\pm 30\%$ muutos tiheydessä vaikuttaa kuljetus- ja varastointikustannuksiin [€] on mahdoton sanoa ilman varastojen investointikustannuslaskelmia. Tämän hetkiset tulokset viittaavat jatkotutkimustarpeeseen ja antavat suunnan sille.

Biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun energiataloudellisuutta ja kannattavuutta ei ole tutkittu ennen tätä työtä. Yksittäisiä kustannuslaskelmia logistiikan eduista on tehty, mutta arviot perustuvat puupelletin ja biohiilen tiheyseron (22 %) vaikutuksiin. Tiheyden herkkyyksianalyysin tavoin kustannuslaskelmat on suoritettu huomioiden puupelletin ja biohiilen tiheyseron vaikutukset kuljetusmääriin. IEA:n tutkimuksen mukaan biohiilen käsittelyn ja kuljetuksen kustannukset ovat 22 % puupellettejä pienemmät.

Tässä työssä oletettiin kuitenkin biohiilen tiheyden olevan puupellettien kanssa samaa luokkaa, koska pelletöinnissä on esiintynyt ongelmia eikä suoranaisesti voida vielä sanoa onko kirjallisuudessa esiintyviin biohiilen tiheyksiin ($0,75\text{--}0,85\text{ t/m}^3$) mahdollista päästä kannattavasti. Täten kustannussäästöjä ei voida vertailla puupelletteihin pelkästään tiheyden avulla, energiatiheys kuvaa paremmin biohiilestä saatua etua niin logistiikkaketjun että käytön aikana. Biohiilen energiamäärä ($13\text{--}15\text{ GJ/m}^3$ vrt. 10 GJ/m^3) on suhteessa puupellettiin noin 30 %, kirjallisuudessa esiintyviin arvoihin jopa 50 %, suurempi. IEA:n tutkimuksen [72] mukaan biohiilen tuotanto kuluttaa 54 % enemmän energiaa kuin puupellettien tuotanto, joten tämä biohiilestä saatu 30–50 % suurempi energiamäärä tulisi suhteuttaa biohiilen tuotannon energiankulutuksen aiheuttamiin lisäkustannuksiin. Lisäksi tulisi huomioida biohiilen loppukäytön edut suhteessa puupelletteihin, jolloin saataisiin realistinen kuva biohiilen käytön kannattavuudesta. Torrefioidun paahtokaasuista saatu energiamäärä tulisi myös huomioida laskelmissa. Kaiken kaikkiaan voidaan sanoa, että biohiilen käyttö on puupellettejä kannattavampaa, etenkin jos pelletöinnin haasteet pystytään selvittämään.

Energiankulutuksen kasvua pelletöinnissä ja jauhatuksessa on hyvin vaikea arvioida. Biohiilen tuotannon sekä logistiikan käytön tutkimustuloksia on hyvin vähän ja biohiilen pelletöinnistä ja jauhatuksesta tiedetään vasta vähän. Pienet muutokset ja

vaihtelut kuuluvat vielä varmuusväleihin, eikä suoranaisia kertoimia riippuvuussuhteiden välille voida määrittää.

Yleisesti ottaen, biohiilestä esiintyvät kirjallisuustutkimustulokset käsittelevät lähinnä biomassan ominaisuuksien muutoksia torrefioinnin jälkeen. Hieman on myös tutkittu pelletöintiä ja jauhamista, mutta tällä hetkellä tutkimustulokset ovat hyvin yksittäisiä, joten niiden perusteella on vaikea arvioida kokonaiskuvaa. Lisäksi epävarmuutta tämän työn tuloksiin yksittäistulosten käytön lisäksi tuo käytettyjen tuloksien suoritus eri menetelmillä ja biohiililaaduilla. Biohiilen paahtoasteen vaikutusta käsittelyvaiheen energiankulutukseen tulisi lisäksi tutkia.

Tämän työn tulokset antavat suuntaa kehitysideoille ja tuleville jatkotutkimuksille. Jatkotutkimuksien tarve kattaa koko biohiilen tuotannon, käsittelyn, logistiikan ja käytön. Tietoa mekaanisista kestävyysominaisuuksista ei ole, joka on ratkaiseva tieto, jotta tehokas käsittely- ja logistiikkaketju on mahdollinen. Lisäksi pelletöinnin haasteet on ratkaistava, jotta kokonaiskuva käsittely- ja logistiikkaketjun energiataloudellisuudesta voidaan muodostaa.

7. YHTEENVETO

Biohiili on lupaava kehitteillä oleva polttoainetuote, jonka uskotaan kehittyvän lähivuosina merkittäväksi voimalaitospolttoaineeksi. TISCO-hankkeen tavoitteena on ollut tutkia torrefiointimenetelmällä jalostetun biopolttoaineen soveltuvuutta kivihiilivoimalaitoksen polttoaineeksi seospoltossa. Tämän työn tavoitteena oli tutkia biohiilen käsittelyn ja logistiikan energiataloudellisuutta.

Biohiiltä valmistetaan puubiomassaa torrefioimalla eli paahtamalla 200–300 °C lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Torrefioinnin aikana biomassasta haihtuvat pääasiassa matalan lämpöarvon volatiilit yhdisteet ja biomassasta poistuu suhteessa enemmän massaa kuin energiaa. Tämä huomataan lämpöarvon nousuna. Biohiilen lämpöarvo voi parhaimmillaan olla 30 % puupellettejä korkeampi.

Torrefiointi muuttaa biomassan sekä polttoaine- että käsiteltävyysominaisuuksia huomattavasti. Torrefioinnin aikana puubiomassan hemiselluloosa hajoaa lähes kokonaan, jolloin ligniinin sekä selluloosan rakenneosuudet kasvavat puubiomassassa. Hajoamisreaktioiden johdosta torrefiointi heikentää puubiomassan mekaanista kestävyyttä, joka huomataan parantuneena jauhautuvuutena. Tämä on huomattava etu, kun tavoitteena on seospolttoa yhdessä kivihiilen kanssa.

Rakennepolymeerien hajoaminen toisaalta taas vaikeuttaa pelletöintiä, koska torrefioinnin aikana puubiomassan ligniinin rakenne ja sidosaineominaisuudet muuttuvat. Torrefioinnin aikana tapahtuneiden ligniinin palautumattomien rakennemuutosten myötä biohiilen ligniini ei pehmene enää samalla lailla eikä sen määrää voida suhteuttaa enää sen ominaisuuteen toimia sidosaineena kuten käsittelemättömällä puubiomassalla. Kosteuden poistuminen puubiomassasta nostaa ligniinin lasinmuutoslämpötilaa ja hemiselluloosan hajoamisen vuoksi pelletöinnissä yleisesti pääsidoksina tunnettujen vetysidoksien muodostuminen ligniinin ja hemiselluloosan välillä vähenee. Torrefioidun puubiomassan ligniinin pehmeneminen vaatii hyvin paljon puupellettejä korkeamman lämpötilan ja paineen.

Lisäksi torrefioinnin aikana puubiomassan hygroσκοoppinen luonne muuttuu. Torrefioinnin aikana OH -ryhmät hajoavat, eikä se pysty enää muodostamaan vetysidoksia veden kanssa kuten käsittelemätön puubiomassa. Tämä on etu

varastoitaessa, jolloin biohiili ei ole yhtä herkkä kosteudelle kuin puupelletti. Hydrofobisuuden lisäksi lisätutkimuksia biohiilen varastointikäyttäytymisestä tarvitaan vielä, jotta laatu ja turvallisuus voidaan taata varastoinnin aikana.

Torrefiointi on kompromissien etsimistä eri ominaisuuksien välille. Osa ominaisuuksista paranee paahtoasteen tummetessa ja osa heikkenee huomattavasti. Paahtoasteen tummetessa biohiilen jauhaminen parantuu, lämpöarvo ja hydrofobinen luonne kasvavat. Samalla kuitenkin rakennepolymeerien hajoamisen vuoksi pelletöitävyys ja biohiilipelletin mekaaninen kestävyys heikkenevät. Prosessin kannattavuuden kannalta on olennaista tuottaa mekaanisesti kestävä biohiilipellettiä ilman, että sen lämpöarvo ja jauhautuvuus kärsivät.

Case-tapauksessa tarkasteltiin biohiilen kuljettamista Kristiinankaupungin tuotantolaitokselta Salmisaaren voimalaitokselle. Salmisaaren voimalaitoksen sisäisen logistiikan ja varastointitilojen haasteellisuus rajaa kuljetus- ja varastointivaihtoehtoja. Salmisaaren voimalaitosalueen ongelmana on varastotilojen niukkuus, joka rajoittaa biohiilen toimittamista alueelle. Alkuperäisten suunnitelmien mukaan biohiili oli tarkoituksena varastoida kivihiilen tapaan maanalaisiin siilostoihin, mutta epävarmuus biohiilen hydrofobisuudesta sekä sen mekaanisista kestävyysominaisuuksista ovat rajanneet varastointivaihtoehtoista kosteat ja korkean pudotuksen vaativat maanalaiset siilostot pois ainakin tällä hetkellä.

Biohiilen käsittely- ja logistiikkaketjun energiankulutus on alle 6 % biohiilestä saadusta polttoaine-energiasta kaikilla kuljetusmuodoilla. Tästä energiankulutuksesta 75 % kuluu pelletöintiin ja kuljetuksen osuus energiankulutuksesta on vain 13 %. Koko käsittely- ja logistiikkaketjun energiataloudellisuuden ja kustannustehokkuuden kannalta yksi oleellisimmista vaiheista on pelletöinti ja sitä kautta biohiilen tiheys. Lämpöarvon nousun myötä pelletöinnin haasteet kasvavat, jolloin lämpöarvon nousun ja pelletöinnin haasteiden välillä tulee löytää kompromissi.

Energiankulutuksellisesti kuljetusmuotojen välillä ei eroja juurikaan ollut tarkastelussa tapauksessa, mutta kuljetusmuodon valintaan liittyvien investointikustannusten vuoksi maantiekuljetus on tällä hetkellä kannattavin vaihtoehto. Pitkällä tähtäimellä, jos Salmisaaren voimalaitoksen sisäiseen logistiikkaan ollaan valmiita investoimaan ja

biohiilen käytön tulevaisuus näyttää voimalaitoksen kannalta positiiviselta, tulisi suoraa aluskuljetusta Salmisaareen pitää myös yhtenä vaihtoehtona. Pitkällä tähtäimellä vaihtoehdon edut tulevat esille erityisesti suuremmilla volyyymeillä ja pitkillä kuljetusetäisyyksillä.

Yleisesti ottaen, rautatiekuljetus on energiataloudellisesti ja kustannuksiltaan hyvin vartenotettava ratkaisu biohiilen kuljettamiseen. Rautatiekuljetuksen lisäksi myös meriteitse tapahtuva kuljetus on maantiekuljetusta kannattavampi ratkaisu, kun tarvittava infrastruktuuri löytyy.

Kaiken kaikkiaan biohiili on erittäin lupaava vaihtoehto kivihiilelle. Torrefiointi tuo merkittävää etua niin logistisesti että käytön kannalta. Lisätutkimuksia tarvitaan ja standardisointia, jotta epävarmuudet ja eroavaisuudet tutkimustulosten välillä pystytään minimoimaan ja arvioimaan tarkasti koko tuotanto-, käsittely-, kuljetus- ja käyttöketjua.

LÄHDELUETTELO

1. Työ- ja elinkeinoministeriö. Kotisivu [online]. 2011 [viitattu 15.9.2012]. EU:n energiayhteistyö. Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=1553>
2. Iikkanen, P., Keskinen, S., Korpilahti A., Räsänen, T. ja Sirkiä A. Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli. Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2011. Helsinki 2011. 28 s. Saatavissa:
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2011-25_energiapuuvirtojen_valtakunnallinen_web.pdf
3. Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S. ja Sipilä, K. Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT tiedotteita 2595. Espoo 2011. 109 s. Saatavissa: https://www.tem.fi/files/29530/Kivihiilen_korvaaminen_biomassoilla_yhteistuotannon_polypolttokattiloissa_VTT.pdf
4. Rautiainen, M., Havimo, M. & Gruduls, K. Biocoal production, properties and uses. The Development of the Bioenergy and Industrial Charcoal Production. Report of BalBiC –project 1/2012. Helsinki 2012. 28 s.
5. Hämäläinen, E. ja Heinimö, J. Esiselvitys puupolttoaineen jalostamisesta torrefiointitekniikalla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti EN B-170. Lappeenranta 2006. 21 s.
6. Phanphanich, M. & Mani, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. Bioresour.Technol. 102(2011). pp. 1246–1253.
7. Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus. Kotisivu [online]. 2011 [viitattu 1.10.2012]. BioRefine -projektit. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/ohjelmat/BioRefine/Projektit?id=10572486>

8. Novox Oy. TISCO -projektin esiselvitykset. Espoo 2012.
9. Liski, J., Repo, A., Känkänen, R., Vanhala, P., Seppälä, J., Antikainen, R., Grönroos, J., Karvosenoja, N., Lähtinen, K., Leskinen, P., Paunu, V. ja Tuovinen, J. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. SYKE – Suomen ympäristökeskus. Suomen Ympäristö 5/2011. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=124523&lan=fi>
10. Happonen, K. Torrefied wood pellets as an alternative fuel to coal: Climate benefits and social desirability of production and use. Master's thesis. University of Helsinki. Department of Economics and Management. Helsinki 2011. 92 p.
11. Jääskeläinen, A.-S. & Sundqvist, H. Puun rakenne ja kemia. Otatieto 2007. 142 s.
12. Stelte, W., Sanadi, A., Shang, L., Holm, J., Ahrenfeldt, J. & Henriksen, U. Recent developments in biomass pelletization – A review. BioRes. 7(2012):3. pp. 4451-4490.
13. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J., Sanadi, A., Ahrenfeldt, J., Shang, L. & Henriksen, U. Pelletizing properties of torrefied spruce. Biomass & Bioenergy. 35(2011). pp. 4690–4698.
14. Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. ja Asikainen, A. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT tiedotteita 2564. Espoo 2010. 149 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2564.pdf>
15. Bergman, P. & Kiel, J. Torrefaction for biomass upgrading. 14th European Biomass Conference & Exhibition. Paris, France. 17–21 October, 2005. 8 p. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>

16. Bergman, P., Boersma, A., Zwart, R. & Kiel, J. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. ECN report. ECN-C—05-013. 2005. 71 p. Saatavissa: <ftp://kernenergie.nl/pub/www/library/report/2005/c05013.pdf>
17. Prins, M., Ptasiński, K. & Janssen, F. Torrefaction of wood 1 & 2. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 77(2006). pp. 28-40.
18. Stelte et al. Fuel pellets from wheat straw: the effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. BioEnergy Research 5(2012):2. pp 450-458.
19. Repellin, V., Govin, A., Rolland, M. & Guyonnet, R. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. Biomass & Bioenergy. 34(2010). pp. 923–930.
20. Agar, D. & Wihersaari, M. Bio-coal, torrefied lignocellulosic resources – Key properties for its use in co-firing with fossil coal – Their status. Biomass & Bioenergy. 44(2012). pp. 107–111.
21. Schorr, C., Muinonen, M. & Nurminen, F.. Torrefaction of biomass. Miktech. Julkaisu 1/2012. Mikkeli 2012. 55 s. Saatavissa: <http://www.miktech.fi/getfile.php?file=161>
22. Prins, J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Technische Universiteit Eindhoven. 2005. Saatavissa: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200510705.pdf>
23. Dufour, A., Girods, P., Masson, E., Normand, S., Rogaume, Y. & Zoulalian, A. Comparison of two methods of measuring wood pyrolysis tar. Journal of Chromatography A. 1164(2007):1-2. pp. 240-247.
24. Bridgeman, T., Jones, J., Williams, A. & Waldron, D. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. Fuel. 89(2010). pp. 3911–3918.

25. Nimlos, M., Brooking, E., Looker, M. & Evans, R. Biomass Torrefaction Studies with a MBMS. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. 48(2003):2. pp. 590-591. Saatavissa:
http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/48_2_New%20York_10-03_0625.pdf
26. Alakangas, E. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT tiedotteita 2045. Espoo 2000. 196 s. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
27. Bergman, P. Combined torrefaction and pelletisation - The TOP process. ECN report. ECN-C--05-073. 2005. 29 p. Saatavissa:
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>
28. Kim, Y., Lee, S., Lee, H. & Lee, J. Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar. Bioresour Technol. 116(2012). pp. 120–125
29. van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J. & Ptansinski, K. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass Bioenergy 35(2011):9. pp. 3748-3762.
30. Uslu, A., Faaij, A. & Bergman P. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Energy. 33(2008):8. pp. 1206-1223.
31. Yan, W., Acharjee, T., Coronella, C. & Vasquez, V. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. Environmental Progress & Sustainable Energy. 28(2009):3. pp. 435–440.

32. Metsäntutkimuslaitos. Puun kosteus [online]. 2010 [viitattu 3.11.2012].
Saatavissa: http://www.skal.fi/files/7544/Puunkosteus_perustietoa.pdf
33. Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X., Jim Lim, C. & Sokhansanj, S. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *App. Energy*. 93(2012). pp. 680–685.
34. Järvinen, T. Torrefaction – Uudet verkkottuneet biojalostamot Euroopan pelto- ja metsäbiomassan energiankantajiksi. Varastointi- ja säänkestokokeet. Biohiiliseminaari. Hanasaari, Helsinki. 29.11.2012. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Saatavissa:
http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/timo_jarvinen.pdf
35. Acharjee, T., Coronella, C. & Vasquez, V. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 102(2011). pp. 4849-4854.
36. Medic, D., Darr, M., Shah, A. & Rahn, S. Effect of torrefaction on water vapor adsorption properties and resistance to microbial degradation of corn stover. *Energy Fuels*. 26(2012). pp. 2386–2393.
37. Agar, D. & Wihersaari, M. Torrefaction technology for solid fuel production. *GCB Bioenergy* 4(2012). pp. 475–478.
38. Ohliger, A., Förster, M. & Kneer, R. Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability. *Fuel*. 104(2013). pp. 607–613.
39. Stelte, W., Dahl, J., Nielsen, N. & Hansen, H. Densification concepts for torrefied biomass. European Biomass Conference. Milano, 2012. DTI Danish Technological Institute. Saatavissa:
http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2012_Milan/Stelte_DTI-densification.pdf

40. Stelte, W. Fuel Pellets from Biomass – Processing, Bonding, Raw Materials. Danish National Laboratory for Sustainable Energy. Technical University of Denmark. DTU -report. December 2011.
41. Hyrkäs, J. Biomassan pelletöinti. Kirjallisuuskatsaus. Oulun yliopisto. Kuitu- ja partikkelitekniiikan laboratorio. Oulu 2010. 25 s. Saatavissa:
http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pelletti_kirjallisuuskatsaus.pdf
42. Larsson, S., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I. & Samuelsson, R. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy*. 102(2013). pp. 827–832.
43. Temmerman, M., Rabiera, F., Jensen, P., Hartmann, H. & Böhm, T. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass Bioenergy*. 30(2006). pp. 964–972.
44. Peng, J., Bi, H., Lim, C. & Sokhansanj, S. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy Fuels*. 27(2013). pp. 967–974.
45. Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M., Rubiera, F. & Pis, J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*. 89(2008). pp. 169-175.
46. Saario, M., Karttunen, V., Illman, J. & Pursula, T. Selvitys biohiilen ja puuraaka-aineen ominaisuuksista. HSE -raportti. Gaia Consulting Oy. 2012.
47. Wilen, C. Torrefaction – taruja ja totuuksia BioRefine-ohjelman torrefaction-projektin valossa. Biohiiliseminaari. Hanasaari, Helsinki. 29.11.2012. VTT. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Saatavissa:
http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/carl_wilen.pdf

48. Shankar, T., Sokhansanj, S., Wright, C. & Boardman, R. Review on biomass torrefaction process and product properties and design of moving bed torrefaction system model development. Idaho National Laboratory. Oak Ridge National Laboratory. INL/EXT-10-19569. August 2010.
49. Kuang, X., Shankar, T., Bi, X., Sokhansanj, S., Jim Lim, C. & Melin, S. Characterization and kinetics study of off-gas emissions from stored wood pellets. *Ann. Occup. Hyg.* 52(2008):8. pp. 675–683. Saatavissa: <http://annhyg.oxfordjournals.org/content/52/8/675.full.pdf+html>
50. Finlex. Luokka 4.2. Helposti itsestään syttyvät aineet. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/1966.pdf>
51. Koivula, P. Palofysiikka ja palontorjunta. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Merenkulun koulutusohjelma. 2008. 69 s. Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/1159/Koivula_Pasi.pdf?sequence=1
52. Suurs, R. Long distance bioenergy logistics. An assessment of costs and energy consumption for various biomass energy transport chains. M.Sc. thesis. Utrecht University. Department of Science, Technology and Society. Utrecht, The Netherlands, 2002.
53. Hamelinck, C., Suurs, R. & Faaij, A. International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy*. 29(2005). pp. 114-134.
54. Pisto, S., Huikuri, N. & Kupari, P. Kiinteän bioenergian terminaaliverkosto selvitys Satakunnassa ja Varsinais-Suomessa. Apila Group Oy Ab. Saatavissa: http://www.metsakeskus.fi/fi_FI/c/document_library/get_file?uuid=e7cf597f-0f35-4e6b-987a-e41eb1164e37&groupId=10156

55. Kallionpää, E., Rantala, J. & Kalenoja, H. Energiatehokkuus logistiikassa. Logistiikan energiatehokkuuden mittaaminen ja parantaminen. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 25/2010. Saatavissa:
http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=964900&name=DLFE-10966.pdf&title=Julkaisuja%2025-2010
56. Pöyrynen, T. Kaakkois-Suomen tavaraliikenneselvitys. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu. Logistiikan koulutusohjelma. Lappeenranta, 2010. 77 s. Saatavissa:
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12912/Terhi_Poyhonen.pdf.pdf?sequence=1
57. Suominen, K. Kuljetusten ympäristöjohtaminen. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tuotantotalouden koulutusohjelma. Rauma, 2007. 56 s. Saatavissa:
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/1149/Suominen_Karoliina_IM.pdf?sequence=1
58. VRTranspoint. Vaunukuvasto. Kotimaan liikenteen vaunut. 69 s. Saatavissa:
http://www.vrtranspoint.fi/attachments/newfolder_5/5x6KHG5PB/Vaunukuvasto_Kotimaa.pdf
59. Innofreight. Kotisivu [online]. [viitattu 5.12.2012]. WoodTainer. Saatavissa:
http://www.innofreight.com/_innofreight/english/2_produkte/2437.php
60. Similä, L. Energiahyödykkeiden merikuljetukset. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Technology 22. Espoo 2012. 68 s. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T22.pdf>

61. Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen, E., Hämäläinen, E. & Vartiamäki, T. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet. Tutkimusraportti EN B-172. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Mikkeli 2007. 68 s + liitteet. Saatavissa:
<https://doria17-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/31096/TMP.objres.542.pdf?sequence=1>
62. Karttunen, K., Jäppinen, E., Väättäin, K. & Ranta, T. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Tutkimusraportti EN B-177. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. 2008. 54 s. + liitteet. Saatavissa:
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42335/isbn9789522146250.pdf?sequence=1>
63. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. LIPASTO [online]. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. 2012 [viitattu 14.12.2012]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/>
64. Metsätalastollinen vuosikirja 2012. Metsäntutkimuslaitos. Vammalan Kirjapaino Oy. Sastamala 2012. s. 197–199.
65. Bloomberg. Homepage [online]. Baltic Dry Index. 2013 [viitattu 12.2.2013]. Saatavissa: <http://www.bloomberg.com/quote/BDIY:IND>
66. Janzé, P. Handle with Care. Bioenergy Insight. 1(2010):1. Saatavissa:
<http://www.advancedbiomass.com/2010/10/handling-pellets-%E2%80%93-things-to-consider/>
67. Bulk Solids Handling. Homepage [online]. Pneumatic or Mechanical Unloaders for Grain. 2013 [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa:
http://www.bulk-solids-handling.com/safety_environment/emission_control/articles/260410/

68. Anglo American. Homepage [online]. Coal – Business overview. 2008 [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: http://ar08.angloamerican.solutions.investis.com/ofr/business_unit/coal/business_overview.html
69. Direct Industry. Homepage [online]. Curved tubular belt conveyor for bulk products. 2013 [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: <http://www.directindustry.com/prod/beumer-group-gmbh-co-kg/curved-tubular-belt-conveyors-for-bulk-products-6191-16040.html>
70. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Symposium 231. Espoo, 2004. 430 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2004/S231.pdf>
71. Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S. & Madrali, S. Status overview of torrefaction technologies. IEA Bioenergy Task 32 report. 2012. 54 p. Saatavissa: http://www.ieabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf
72. Sosiaali- ja terveydenhuollon tuotevalvontakeskus. Kemikaalien yhdenmukaistettu luokitus- ja merkintäjärjestelmä [online]. 19.12.2006 [viitattu 14.12.2012]. Saatavissa: <http://www.sttv.fi/kemo/GHS.htm>
73. SECTOR. Homepage [online]. 2012 [viitattu 8.1.2012]. Saatavissa: <http://www.sector-project.eu/>
74. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. Räjähdyksvaarallisia tiloja ja laitteita (ATEX) koskevat standardit. 10.2.2009 [viitattu 14.12.2012]. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/vaaralliset_aineet/ohjeet/atexstandardit.pdf

Haastattelut

75. Koskinen Pekka. Partner, Senior Advisor. Talent Vectia Ltd. Keilasatama 5, 02151 Espoo. Kokous 29.1.2013.

LIITTEET

- LIITE 1. TISCO –projektissa tehtyjen jauhatuskokeiden tulokset.
- LIITE 2. Energiataloudellisen tarkastelun tulokset.
- LIITE 3. Tuotannon ja käytön lähtötilanne.
- LIITE 4. Suora kuljetus Salmisaareen -kuljetusskenaarion tuotanto-, toimitus- ja käyttömäärät.
- LIITE 5. Välivaraston kautta Salmisaareen -kuljetusskenaarion tuotanto-, toimitus- ja käyttömäärät.

TISCO –projektissa tehtyjen jauhatuskokeiden tulokset.

	Kivihiili	15/85	30/70	50/50	70/30	Biohiili	
306 °C	99	122	170	253	294	452	J/m ²
284 °C	99	165	303	408	463	574	J/m ²

Kivihiili	15/85	30/70	50/50	70/30	Biohiili	306 °C
5,25	5,05	5,25	5,18	5,15	5,28	kg/h
22	28	33	33	39	45	W
0,0042	0,0055	0,0063	0,0064	0,0076	0,0085	kWh/kg

Kivihiili	15/85	30/70	50/50	70/30	Biohiili	284 °C
5,25	5,18	5,04	5,21	5,17	5,30	kg/h
22	27	36	44	47	52	W
0,0042	0,0052	0,0071	0,0084	0,0091	0,0098	kWh/kg

Biohiilen käsittelyketjun energiataloudellisen tarkastelun tulokset.

Pelletöinti /42/	
Pelletöintiteho	22 kW
Tuotantoaste	220 kg/h
	0,10 kWh/kg

Tuotevarasto ²⁾ (Kristiinankaupunki)	
Varastokoko (3 x 2 500 m3)	7 500 m3
Teho	46 kW
Energiankulutus	276 000 kWh/a
	0,0028 kWh/kg

Välivarasto ²⁾ (Inkoo)	
Varastokoko	7 500 m3
Teho	26 kW
Energiankulutus	156 000 kWh/a
	0,0016 kWh/kg

Käyttövarasto ²⁾ (Salmisaari)	
Varastokoko	2 500 m3
Teho	69 kW
Energiankulutus	414 000 kWh/a
	0,0041 kWh/kg

²⁾ Perustuu Novox Oy:n tekemiin arvioihin

Jauhatus ³⁾	284 °C	306 °C
Jauhamisteho	0,052	0,045 kW
Tuotantoaste	5,30	5,28 kg/h
	0,0098	0,0085 kWh/kg

³⁾ TISCO -projetissa tehtyjen jauhatustestien tulokset

Biohiilen tuotannon ja käytön lähtötilanne.

Biohiilen tuotanto	
Vuotuinen käyttöaika	6 000 h/a 250 pvä 8,3 kk
Tuotanto-/varastointimäärä	100 000 t/a 17 t/h 28 m ³ /h 24 h/pvä
syys - toukokuu	400 t/pvä 12 000 t/kk

Kivihiilen käyttömäärä Salmisaassa ~320 000 t/a	
LHV, saap.tila	26 MJ/kg
vastaa energiamäärältään	232 090 GWh/a

Biohiilen tuotantomäärä 100 000 t/a	
Tiheys	0,6 t/i-m ³
LHV, saap.tila	21 MJ/kg
	58 333 GWh
vastaa kivihiilen käytön energiamäärästä	25 %

Tuote- ja välivarasto	
Varaston koko	7 500 m ³
Biohiiltä mahtuu	4 500 t
Täyttyminen kestää	11 pvä
Vastaa käyttöä (maksimikulutuksen aikana)	6 pvä

Käyttövarasto	
Varaston koko	2 000 m ³
Biohiiltä mahtuu	1 200 t
Vastaa käyttöä (maksimikulutuksen aikana)	2,6 pvä

Suora kuljetus Salmisaareen -kuljetusskenaarion tuotanto-, toimitus- ja käyttömäärät.

Biohiili 100 000 t/a		tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
Tuotanto [t/kk] Käyttö [t/kk] Biohiilen polttoaine- energian seossuhde (alle 50 %)	Tuotanto [t/kk]	12 000	12 000	12 000	12 000	10 300	5 700	12 000	12 000	12 000
	Käyttö [t/kk]	14 000	13 700	12 000	12 000	10 300		12 000	12 000	14 000
		20 %	22 %	20 %	26 %	48 %		49 %	31 %	19 %

Toimitukset Salmisaareen		tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
t/vrk (ark.) t/kk (ark.) Rekka Salmisaareen, kpl/vrk (ark.) Rekka Salmisaareen, kpl/kk (ark.)	t/vrk (ark.)	700	625	600	600	515		600	600	700
	t/kk (ark.)	14 000	12 500	12 000	12 000	10 300	1 200	12 000	12 000	14 000
	Rekka Salmisaareen, kpl/vrk (ark.)	18	16	15	15	13		15	15	18
	Rekka Salmisaareen, kpl/kk (ark.)	350	313	300	300	258	30	350	300	350

Toimitukset Salmisaareen		tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
Yhteensä t/kk (ark.) Irtolastialus (4 000 t), kpl/kk (ark.)	Yhteensä t/kk (ark.)	16 000	12 000	12 000	12 000	8 000	4 000	12 000	12 000	12 000
	Irtolastialus (4 000 t), kpl/kk (ark.)	4	3	3	3	2	1	3	3	3

Välivaraston kautta Salmisaareen –kuljetusskenaarion tuotanto-, toimitus- ja käyttömäärät.

Biohiili	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
Tuotanto [t/kk]	12 000	12 000	12 000	12 000	8 000	8 000	12 000	12 000	12 000
Käyttö [t/kk]	14 000	14 000	12 000	12 000	10 000		12 000	12 000	14 000
Biohiilen polttoaine-energian seossuhde (alle 50 %)	20 %	22 %	20 %	26 %	47 %		49 %	31 %	19 %

Toimitukset Inkooseen	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
Yhteensä t/kk (ark.)	16 000	12 000	12 000	12 000	8 000	4 000	12 000	12 000	12 000
Irtoastialus (4 000 t), kpl/kk (ark.)	4	3	3	3	2	1	3	3	3

Toimitukset Salmisaareen	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	syys	loka	marras	joulu
ton/vrk (ark.)	700	700	625	600	400		600	600	700
ton/kk (ark.)	14 000	14 000	12 500	12 000	8 000	1 500	12 000	12 000	14 000
Rekka Salmisaareen, kpl/vrk (ark.)	18	18	16	15	10		15	15	18
Rekka Salmisaareen, kpl/kk (ark.)	350	350	313	300	200	38	350	300	350

Puu-127

~~Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan korkeakoulu
Puunjalostustekniikan kirjasto~~